

# НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНОВ

---

Р. Джонс  
И. Фэкзоару

Р. ДЖОНС, И. ФЭКЭОАРУ

# НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ БЕТОНОВ

*Перевод с румынского В. М. Маслбойщикова*



МОСКВА, СТРОЙИЗДАТ, 1974

УДК 691.32 : 620.179.1

R. JONES, I. FĂCĂOARU

ÎNCERCAREA  
NEDISTRUCTIVĂ  
A  
BETONULUI

EDITURA TEHNICĂ  
Bucureşti

**Джонс Р., Фэцэоару И.** Не разрушающие методы испытаний бетонов. Пер. с румынск. М., Стройиздат, 1974, 292 с.

Дана классификация неразрушающих методов контроля качества бетона и железобетонных конструкций. Рассмотрены методы: резонансный, ультразвуковой импульсный, поверхностных волн, механические неразрушающие, радиометрические и радиографические, электромагнитные и комбинированные. В каждом разделе книги приведены теоретические основы рассматриваемого метода, описание приборов, области их применения.

Книга предназначена для инженерно-технических работников строительных организаций и предприятий промышленности строительных материалов, а также для научных работников научно-исследовательских организаций.

Научный редактор — канд. техн. наук Г. Я. Почтовик

© Стройиздат, 1974.

Л  $\frac{30209-358}{047(01)-74}$  80-74

## ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Предлагаемый читателям перевод книги Р. Джонса и И. Фэкзоару «Не разрушающие методы испытаний бетонов» содержит систематизированные результаты исследований и практических приложений современных методов неразрушающего контроля свойств и состояний бетона как в процессе его изготовления, так и непосредственно в конструкциях и сооружениях.

Книга Р. Джонса и И. Фэкзоару интересна тем, что в ней широко отражен опыт, который обобщен Комиссией по неразрушающим испытаниям при РИЛЕМ, а также опыт авторов — известных европейских специалистов в области неразрушающих испытаний бетона.

Своей практической направленностью, большим количеством примеров производственного применения новых методов и подробными методическими рекомендациями книга существенно отличается от ранее вышедших работ Р. Джонса (Кэмбридж, Юнивёрсити Пресс, 1962 г. и Париж, Эйроль, 1967 г.).

Результаты собственных исследований авторов вошли в изложение ультразвукового импульсного метода, поверхностной волны, радиационного и комбинированных методов. Особенно интересными для советских читателей будут разделы, в которых освещаются не применявшиеся в СССР методы испытания дорожных и аэродромных покрытий волнами Лэмба и методы измерения затухания ультразвука. Много нового читатель найдет в разделах, освещающих радиационные, электромагнитные и комбинированные методы.

Некоторые практические методики, разработанные авторами (например, радиационная дефектоскопия, определение упругих свойств материалов ультразвуком), выходят за рамки испытания бетона и железобетона и могут быть распространены на другие материалы.

Оригинальный прием уточненного прогноза прочности бетона неразрушающими методами на основе так называемых коэффициентов влияния, разработанный И. Фэкзоару и стандартизованный в Румынии, также представляет большой практический интерес для советского читателя.

Неразрушающие испытания освещены по главам в таком порядке: резонансный метод, ультразвуковой импульсный, методы поверхностной волны и поверхностной твердости, радиационный, электромагнитный и комбинированные неразрушающие методы.

При изложении содержания каждой главы авторы придерживались следующего плана: физические основы метода, аппаратура, описание техники испытаний, обработка результатов испытаний, оценка полученных данных.

Разбираются также различные специальные случаи применения неразрушающих методов испытания бетона.

Изданная в Румынии книга Р. Джонса и И. Фэкэоару, естественно, ориентирована на опыт и потребности строительства в этой стране. Однако в ней много материалов, освещающих развитие методов неразрушающего контроля бетона и в других странах.

Авторы частично отразили опыт в области неразрушающего контроля, имеющийся в СССР. Но в целом научные работы и внедрение их результатов в строительство, которые характерны для последних десяти лет развития советских исследований в области неразрушающего контроля качества бетона, отражены недостаточно. Поэтому мы сочли необходимым дать в сносках дополнительные ссылки на работы советских ученых.

Считаем своим долгом выразить признательность канд. техн. наук Л. Б. Пирожникову, оказавшему большую помощь при переводе текста и уточнении некоторых формулировок, а также канд. техн. наук Г. Б. Шмакову за ряд ценных замечаний, сделанных в процессе подготовки книги к изданию.

*Канд. техн. наук Г. Я. ПОЧТОВИК*

## ВВЕДЕНИЕ

**Классификация неразрушающих методов испытания бетона.** Для классификации необходимо принять во внимание следующее: во-первых, учитывать ту физическую основу, на базе которой разработан метод испытания, и, во-вторых, учитывать свойства бетона, которые могут быть определены одним или несколькими методами.

Классификация методов испытания по физической основе приведена на схеме 1. Эта классификация методов является более предпочтительной и использована в настоящей книге. Как видно, неразрушающие методы основаны на принципах, изложенных в различных разделах физики, а именно: в механике, акустике, электромагнетизме и атомной физике.



Схема 1

Специалистам, которые захотят применить существующие методы на практике, проанализировать и решить, какой из них можно использовать для определения свойств бетона, в каждом отдельном случае рекомендуем воспользоваться общей классификацией по схеме 2.

По этой классификации можно использовать две группы методов испытания или больше. Классификация по схеме 2 была уточнена по справочным данным и проверена опытным путем.



Схема 2

# 1. РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД

Резонансный метод в настоящее время находится в стадии разработки, обеспечивающей его лабораторное применение, так как возбуждение колебаний в конструктивных элементах требует энергии, превышающей возможности известных типов возбудителей<sup>1</sup>.

Длину образца  $l$ , применяемого для испытания в виде призмы или цилиндра рекомендуется определять из условия

$$l \geq 4a, \quad (1.1)$$

где  $a$  — размер поперечного сечения образца.

Соблюдение условия (1.1) облегчает установление собственной частоты образца и снижает количество поправок в расчете.

Теоретически разработана методика испытаний также для образцов в виде коротких призм, кубов и дисков [1], что позволяет уменьшить трудности при определении их резонанса.

Резонансный метод дает удовлетворительные результаты в следующих областях применения:

исследование процессов твердения бетона, а также параметров, влияющих на этот процесс;

определение динамических упругих характеристик бетона;

исследование поведения бетона при повторных циклах замораживания-оттаивания и в агрессивных средах;

определение плотности и прочности бетона в образцах.

## 1.1. ПРИНЦИП РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА

Образец в виде стержня, подвергнутый воздействию внешнего импульса, свободно колеблется по закону, который приближенно можно распространить на механическую систему с одной степенью свободы без учета потерь:

$$m \ddot{x} + kx = 0, \quad (1.2)$$

где  $m$  — масса системы;  $k$  — упругая постоянная системы;  $x$  — перемещение.

Общее решение уравнения (1.2) имеет вид

$$x = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t, \quad (1.3)$$

---

<sup>1</sup> В Советском Союзе трудность, упоминаемая авторами, преодолена в конструкциях ряда стендов для вибрационных испытаний в режиме вынужденных колебаний (резонансная схема) (примеч. науч. ред.).



где

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.4)$$

называется круговой частотой собственных колебаний механической системы, которая связана с частотой колебаний  $f_n$  отношением

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}. \quad (1.5)$$

Для случая, когда имеется внешний источник вибраций с частотой колебаний  $\omega$ , уравнение (1.2) принимает вид

$$m \ddot{x} + kx = F_0 \sin \omega t. \quad (1.6)$$

Уравнение (1.6) получается из общего решения однородного уравнения (1.2) и частного решения неоднородного уравнения (1.6):

$$x = A \sin \omega_n t + B \cos \omega_n t + \frac{\frac{F_0}{k}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \sin \omega t. \quad (1.7)$$

Следует отметить, что амплитуда колебания  $x$  достигает максимума при

$$\omega = \omega_n \quad (1.8)$$

или

$$f = f_n. \quad (1.9)$$

В таких условиях явление резонанса может быть зарегистрировано при использовании электронных или акустических средств. Это явление используют при определении частот собственных колебаний  $f_n$  механической системы.

Резонансный метод не рассматривается детально, а лишь дается схема колеблющегося образца, для которого приведены уравнения определения резонанса. Результаты решений уравнений являются характерными для цельного образца, а измеренная величина частоты резонанса относится к области порога слышимости.

При практическом применении резонансного метода необходимо учесть, что сам метод не может применяться для испытания здания в целом или для его составных элементов<sup>1</sup>. При применении образцов к ним предъявляются следующие требования:

поперечное сечение должно быть постоянным;

---

<sup>1</sup> С мнением авторов здесь согласиться нельзя. Вибрационные испытания в режиме вынужденных колебаний (резонансные испытания) целых сооружений используются давно и успешно. Начало таким испытаниям положено в Советском Союзе в 1928 г. Известны работы И. М. Рабиновича и Н. С. Стрелецкого (динамические испытания стальных мостов), Ю. А. Нилендера, Е. С. Сорокина, И. Л. Корчинского, Е. Е. Гибшмана, Н. А. Крылова, В. А. Калашникова, Э. А. Сехниашвили, Г. А. Шаниро (примеч. науч. ред.).

форма образца должна быть удлиненной в одном направлении (стерженьевая);

опирание образца во время испытания соответствует методу возбуждения колебаний измеряемой гармонике.

Для проведения испытания резонансным методом необходимо располагать достаточно полной информацией об образце, причем сам образец не должен иметь каких-либо дефектов.

## 1.2. РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Измерение собственной частоты колебаний образца — самый распространенный метод, при котором возбуждаются продольные колебания в образце типа волн растяжения-сжатия. С этой целью со стороны торца призматического образца располагают излучатель колебаний (возбудитель)  $E$ , ось которого параллельна оси образца и частота которого может изменяться. В образце создаются колебания, распространяющиеся в виде волн растяжения-сжатия от излучателя  $E$  к приемнику (звукоснимателю)  $R$ , размещенному на противоположном торце. Для исключения изгиба образец опирают посередине.

Благодаря изменению частоты колебаний излучатель может создавать колебания с длиной волны, равной  $\lambda$ , которая должна быть одинаковой с длиной образца  $l$ . При данном положении звуковые волны распространяются до тех пор, пока с помощью интерференции вынужденные и собственные колебания образца не создадут систему стоячих волн. В такой момент наблюдается явление резонанса, т. е. частота возмущающей силы совпадает с основной собственной частотой стержня.

Определить эту частоту легко, поскольку [см. уравнение (1.7)] амплитуда колебаний в этот момент становится наибольшей (теоретически бесконечной).

Характер изменения амплитуды колебаний показывает наличие узловой точки в середине образца. Подтверждается вывод, что в этой точке может быть поставлена опора и звуковые колебания идут вдоль образца.

Для определения длины призмы служит равенство

$$l = \frac{\lambda_L}{2} \quad (1.10)$$

или

$$l = \frac{v_D}{2f_{L_1}}, \quad (1.11)$$

где  $v_D$  — скорость волны растяжения-сжатия, т. е. продольной волны;  $f_{L_1}$  — основная частота продольных колебаний образца.

Если в (1.11) введем выражение  $v_D$ , известное из физики распространения продольных волн, то

$$v_D = \sqrt{\frac{E_d}{\rho_d}}. \quad (1.11a)$$

Подставляя (1.11а) в (1.11), выразим в функции  $E_d$  остальные величины, тогда получим

$$E_d = 4l^2 f_{L_1}^2 \rho_d, \quad (1.12)$$

где  $\rho_d$  — плотность материала.

При непрерывном увеличении частоты и сохранении способа расположения образца на опорах можно получить резонанс от нечетной гармоники основной частоты; таким образом, для гармонических колебаний третьего порядка отношение (1.12) примет следующий вид:

$$E_d = \frac{4}{9} l^2 f_{L_3}^2 \rho_d. \quad (1.13)$$

То же, для гармоник пятого порядка

$$E_d = \frac{4}{25} l^2 f_{L_5}^2 \rho_d. \quad (1.14)$$

В большинстве случаев для гармоник нечетного порядка динамический модуль упругости получают с помощью уравнения

$$E_d = \frac{4}{k^2} l^2 f_{L_k}^2 \rho_d, \quad (1.15)$$

где  $k$  — порядок гармоники.

Для возбуждения гармоники второго порядка образец опирают на две опоры. Форма колебания образца синусоидальная, расчетная формула для определения динамического модуля упругости имеет вид

$$E_d = \frac{4}{4} l^2 f_{L_2}^2 \rho_d. \quad (1.16)$$

Для возбуждения гармоники четвертого порядка можно использовать две опоры вблизи торцов (рис. 1.1, а). Форма колебания изображена на рис. 1.1, б, а расчетная формула для определения динамического модуля упругости имеет вид

$$E_d = \frac{4}{16} l^2 f_{L_4}^2 \rho_d. \quad (1.17)$$

Из изложенного можно сделать общие выводы.

1. Для возбуждения продольных колебаний необходимо, чтобы ось образца совпадала с осями возбуждателя и звукоснимателя.

2. Опоры образца выполняют из материала, поглощающего колебания (силан, упрочненный в холодном состоянии полистирол, эластичный каучук и пр.), минимальная ши-

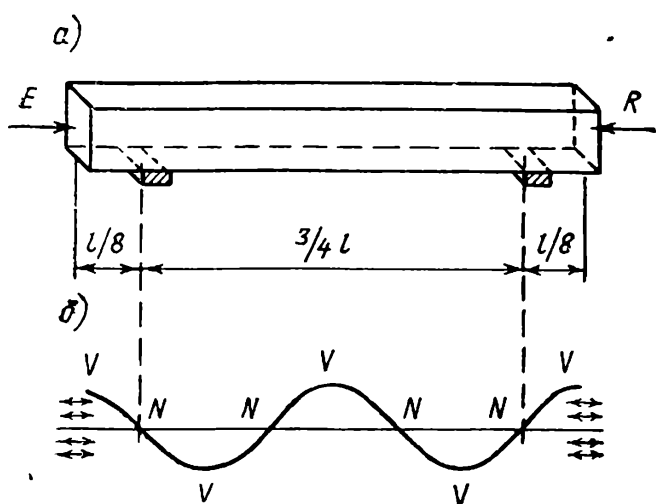


Рис. 1.1. Продольные колебания в стержне гармоники четвертого порядка  
а — схема испытания; б — форма колебаний ( $k=4$ )

рина (2—3 см) которого обеспечивает устойчивость образца. Опоры должны быть расположены по всей ширине поперечного сечения образца.

3. Расположение опоры по середине образца необходимо для испытания на основной частоте и на всех гармониках нечетного порядка  $k$  (для основной частоты можно принять  $k = 1$ ). Для гармоник четного порядка необходимо устанавливать образец на две опоры, симметрично от центра на расстоянии, зависящем от порядка гармоники. Для гармоники порядка  $k$  это расстояние принимается равным  $l/2k$ .

4. Во всех случаях для основной гармоники и для гармоник четного или нечетного порядка динамический модуль упругости определяется по формуле

$$E_d = \frac{4}{k^2} l^2 f_{Lk}^2 \rho_d, \quad (1.18)$$

где  $k$  — порядок гармоники, равный 1 для основной частоты.

5. Единицы, в которых выражается величина  $E_d$ , принимаются в  $\text{Н/м}^2$  по системе СИ и в  $\text{кгс/см}^2$  по системе МКС. Для выражения в системе МКС применяется и следующий вид уравнения (1.18):

$$E_d = \frac{4}{k^2} l^2 f_{Lk}^2 \frac{\gamma_a}{g}, \quad (1.19)$$

где  $\gamma_a$  — удельная (объемная) масса материала;  $g$  — ускорение силы тяжести, равное  $9,81 \text{ м/с}^2$ .

6. В тех случаях, когда испытывают образцы относительно короткие в сравнении с размерами их диаметра, необходимо вносить поправки в расчетные значения в формулах (1.18) и (1.19):

$$E_d^{\text{КОП}} = c_L E_d. \quad (1.20)$$

Величину коэффициента  $c_L$  установил Банкрофт [3], значение коэффициента приведено в табл. 1.1 для цилиндрической призмы диаметром  $d$  из материалов с динамическим коэффициентом Пуассона  $\nu_d$  в пределах 0,15—0,35. Для испытания образца квадратного поперечного сечения со стороной  $a$  вместо диаметра  $d$  применяется эквивалентное отношение

$$d = 1,15a, \quad (1.21)$$

Таблица 1.1. Поправочные коэффициенты  $c_L$

Отношение $d/\lambda$	$\nu_d = 0,15$	$\nu_d = 0,25$	$\nu_d = 0,35$
0,1	1	1	1,01
0,2	1	1,01	1,02
0,3	1,01	1,03	1,06
0,4	1,03	1,07	1,12
0,5	1,07	1,13	1,2
0,6	1,17	1,26	1,36
0,8	1,6	1,67	1,77

Таблица 1.2. Поправочные коэффициенты  $c_L$  для образцов из обыкновенного бетона

Размер образца в см	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
10×10×55	1	1,01	1,03
10×10×30	1,01	1,06	1,24
20×20×80	1	1,03	1,1
4×4×16	1	1,03	1,1
10×10×40	1	1,03	1,1

а для поперечного прямоугольного сечения принимается общая формула

$$d = \sqrt{\frac{2}{3} (a^2 + b^2)} . \quad (1.22)$$

Для образцов бетона испытания на резонанс проводятся с введением поправок в соответствии с данными табл. 1.2.

7. Значение основной частоты резонанса продольных колебаний находится по отношению к гармоникам приблизительно в пропорции 1:2:3:4. Для коротких призм могут быть довольно значительные отклонения от значений, приведенных в пропорции, в сторону уменьшения. Аппаратура, применяемая в резонансном методе, должна обеспечивать диапазон измерения частот выше гармоники второго или третьего порядка.

8. Каждая гармоника имеет количество узловых точек в принятой схеме, соответствующее ее порядку.

9. Основную частоту ( $k = 1$ ) и нечетную гармонику ( $k = 3, 5, \dots$ ) можно возбуждать только из одного положения — при расположении опоры в центре. Четная гармоника ( $k = 2, 4, \dots$ ) требует размещения двух опор симметрично по обе стороны от середины образца на расстоянии  $x$ , которое зависит от порядка гармоники и определяется из выражения

$$x = \frac{k-1}{2k} l . \quad (1.23)$$

### 1.3. РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Один из способов резонансных измерений базируется на возбуждении в призматическом образце изгибных волн вместо волн растяжения. С этой целью излучатель и приемник закрепляются в одном из положений, указанном на рис. 1.2, а. Расстояние между опорами выбирается симметрично по обе стороны от середины образца, равное  $0,552 l$ . Направление колебаний происходит по вертикали перпендикулярно к оси образца (рис. 1.2, б). С помощью изменения частоты колебаний излучателя  $E$  можно добиться того, чтобы частота возмущающих колебаний совпадала бы с частотой собственных колебаний образца, в данном случае возникает явление резонанса. Это явление позволяет определить частоту собственных колебаний образца, которая, в свою очередь, дает возможность определить динамический модуль упругости материала. С этой целью обратимся к основному уравнению изгибной волны:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{EJ}{\rho_d A} \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad (1.24)$$

и в качестве его решения по одной из переменных в частных производных получим уравнение в виде

$$y = X(x) T(t) , \quad (1.25)$$

в котором выбирают за функцию время  $T(t)$  и получают одно периодическое решение:

$$T(t) = A \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.26)$$

Принимая за функцию  $X(x)$  в случае, когда условия опирания не изменяют собственных колебаний стержня, получаем одно решение в виде

$$X(x) = B \cos kx \operatorname{ch} kx. \quad (1.27)$$

Решение, подставленное в (1.24), дает

$$\omega = k^2 \sqrt{\frac{E_d J}{\rho_d A}} = 2\pi f_F. \quad (1.28)$$

Полагаем

$$\cos kl \operatorname{ch} kl = 1. \quad (1.29)$$

Приближенное решение уравнения (1.29) принимает вид

$$kl = (2i + 1) \frac{\pi}{2} = k_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (1.30)$$

которое подставляем в (1.28), чтобы выразить значение как функцию  $E_d$ , и получаем формулу

$$E_d = \frac{4\pi^2 l^4 \rho_d A f_{F_i}^2}{J k_i^4} = \frac{4\pi^2 l^3 G f_{F_i}^2}{g J k_i^4}, \quad (1.31)$$

где  $G$  — масса образца;  $f_{F_i}$  — гармоника порядка  $i$  собственной частоты (для основной  $i = 1$ );  $J$  — момент инерции, имеющий значения:

$$\begin{aligned} \text{для стержня круглого сечения} \quad J &= \frac{\pi r^4}{4}; \\ \text{» » квадратного »} \quad J &= \frac{a^4}{12}; \\ \text{» » прямоугольного »} \quad J &= \frac{ba^3}{12}; \end{aligned}$$

$k_i$  — коэффициент, который зависит от порядка гармоники.

Он дан приближительной формулой (1.30), и его значения приведены в табл. 1.3.

Для балок прямоугольного поперечного сечения формулу (1.31) можно переписать в виде

$$E_d = \frac{48\pi^2 l^4 \gamma_a f_{F_i}^2}{ga^2 k_i^4}. \quad (1.32)$$

Пикетт [4] показал, что в формуле (1.31) или (1.32) отсутствует поправочный коэффициент  $T_i$ :

$$E_d^{\text{кор}} = E_d T_i. \quad (1.33)$$

В табл. 1.4 приведены значения коэффициента  $T_i$  в функции отношения  $a/l$  и порядка  $i$  гармоники для величины  $\nu_{d_j} = 0,2$ .

Таблица 1.3. Расчетный коэффициент  $k_i$

$k_1=4,73$	$k_4=14,137$
$k_2=7,853$	$k_5=17,279$
$k_3=10,996$	$k_6=20,42$

Таблица 1.4. Поправочный коэффициент  $T_i$

$a/l$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$
0,1	1,07	1,18	1,33	1,56	1,81
0,2	1,27	1,73	2,4	—	—
0,3	1,58	2,8	—	—	—
0,4	1,94	—	—	—	—

Из приведенных в табл. 1.4 данных следует, что в образцах обычных размеров, даже при измерениях основной частоты, необходимо применять поправочный коэффициент 1,2—1,4.

Для возбуждения любой четной или нечетной гармоники резонанса изгибных колебаний применяют перемещение опор. Перемещение места опоры производится непрерывно, начиная от точки опоры, соответствующей основной частоте ( $0,224l$ ), по направлению к торцам образца по мере того, как увеличивается порядок гармоники. Траектория изгибных колебаний образца на первых четырех гармониках изображена на рис. 1.3, а, б. На рисунках мы видим, что количество узлов колебаний, расположенных в плоскости изгиба, превышает порядок гармоник на одну единицу:

$$n = i + 1. \quad (1.34)$$

На рис. 1.3, б мы видим также, что опирание посередине образца, принятое для четной гармоники изгибных колебаний, аналогично тому, которое принято при возбуждении основного тона и нечетных гармоник при резонансе продольных колебаний.

Резонанс изгибных колебаний, применяемый в балках квадратного или прямоугольного сечения, часто характеризуется двумя близкими резонансами, соответствующими двум плоскостям изгиба, между которыми имеется всегда небольшая разница в размерах или же в свойствах мате-

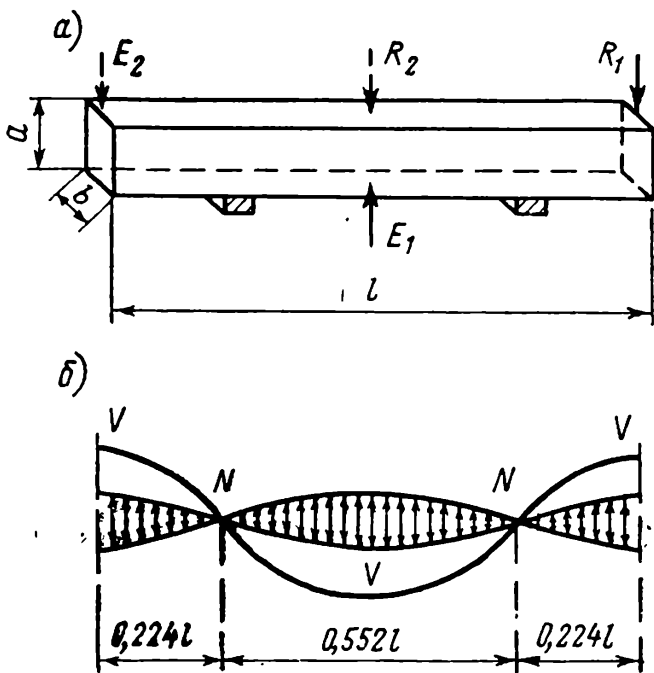


Рис. 1.2. Изгибные колебания в стержне  
а — схема испытания; б — основной тон

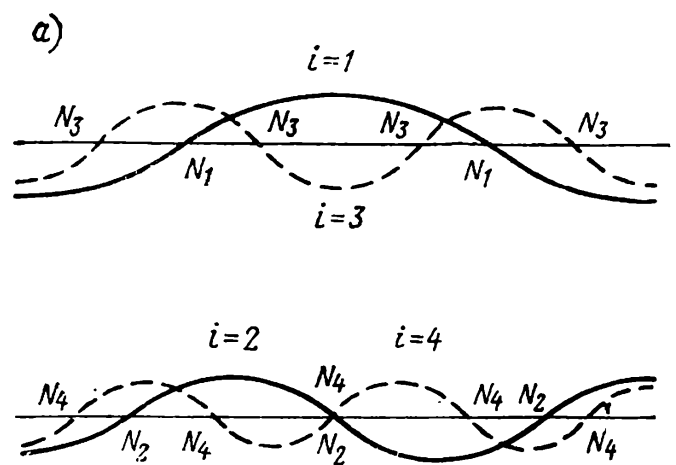


Рис. 1.3. Гармоники изгибных колебаний  
а — нечетные; б — четные

риала (например, направление вдоль и поперек укладки). Такое явление сопровождается резонансной кривой с двойным пиком, при котором невозможно измерение затухания и затруднено установление истинной резонансной частоты.

В заключение следует сказать, что применение резонансного метода изгибных колебаний в технике является более сложным, чем метода продольных колебаний.

#### 1.4. РЕЗОНАНСНЫЙ МЕТОД КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Возбуждение крутильных колебаний сводится к одному из видов поперечных колебаний, возникающих в образце с одной опорой посередине.

Предпочтительным способом для получения крутильных колебаний является расположение излучателя  $E$  и приемника  $R$  перпендикулярно оси образца и установленных близко к торцам образца; опора образца находится посередине (рис. 1.4, а). По этой причине возбуждатель и звукоприемник располагаются по продольной стороне образца вблизи торцов в их плоскости.

Изменяя частоту возбуждения в образце, можно получить резонанс, который для основных частот имеет вид, изображенный на рис. 1.4, б. Расположение пучностей и узлов здесь аналогично расположению, изображенному на рис. 1.2 для резонанса продольных колебаний, однако направление колебаний перпендикулярно продольной оси образца. Амплитуда колебаний также изменяется от нуля в центре до своего максимального значения на торцах стержня.

Собственная частота крутильных колебаний может быть связана с динамическим модулем сдвига ( $G_d$ ). С этой целью составляют выражение, которое связывает на резонансной частоте основного тона длину волны деформации сдвига с длиной образца таким равенством:

$$l = \frac{\lambda_T}{2} \quad (1.35)$$

или

$$l = \frac{v_T}{2f_{T_1}}, \quad (1.36)$$

где  $v_T$  — скорость поперечной волны (волны деформации сдвига);  $f_{T_1}$  — собственная основная частота крутильных колебаний.

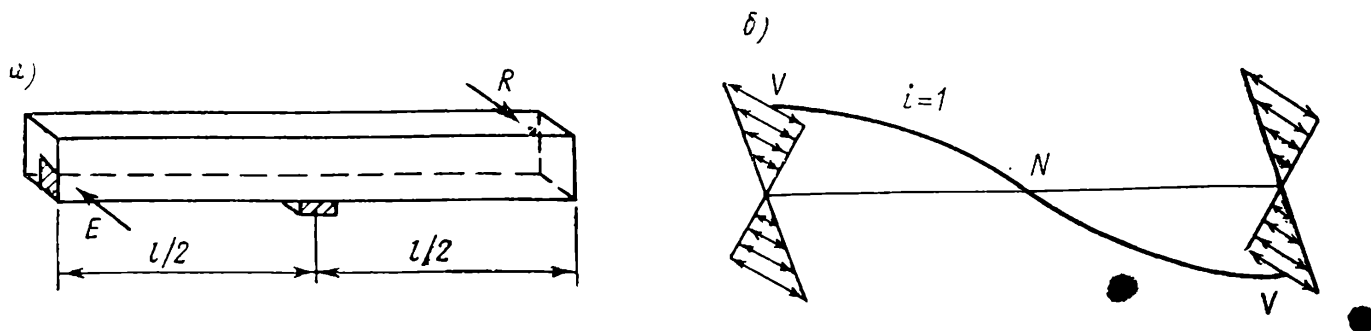


Рис. 1.4. Крутильные колебания в стержне  
а — схема испытания; б — основной тон



Если в уравнение (1.36) введем значение для  $v_T$ , взятое из физики распространения волн сдвига:

$$v_T = \sqrt{\frac{G_d}{\rho_d}}, \quad (1.36a)$$

то получим

$$G_d = 4l^2 f_{T_1}^2 \rho_d. \quad (1.37)$$

Это выражение аналогично выражению (1.12) и может быть также обобщено для любой из гармоник в виде

$$G_d = \frac{4}{k^2} l^2 f_{T_k}^2 \rho_d. \quad (1.38)$$

Предполагается, что эта формула полностью справедлива только для свободных крутильных колебаний и только для цилиндров кругового сечения. Для стержней иного поперечного сечения в выражение (1.38) необходимо внести коррективы в соответствии с выражением

$$G_d^{\text{коп}} = G_d R, \quad (1.39)$$

в котором поправочный коэффициент  $R$  имеет значения: для квадратного сечения  $R = 1,183$ ; для прямоугольного сечения

$$R = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4 \frac{b}{h} - 2,52 \left(\frac{b}{h}\right)^2 + 0,21 \left(\frac{b}{h}\right)^6}, \quad (1.40)$$

где  $b$  — ширина образца;  $h$  — высота образца.

Резонансный метод крутильных колебаний представляет собой полную аналогию с резонансным методом продольных колебаний: можно отметить общий подход при решении вопросов опирания образцов, возбуждения гармоник, вида деформации среднего волокна, определения модулей упругости, являющихся соответственно динамическими. Разница между обоими методами состоит лишь в ориентации и расположении излучателя  $E$  и приемника  $R$  в направлении колебаний.

Говоря о методах, основанных на измерениях резонансных частот, можем остановиться на следующем: полученный на базе основной частоты каждый тип гармоники колебаний находят по отношению к основной частоте по данным табл. 1.5.

В табл. 1.6 для заданного значения коэффициента Пуассона  $\nu_d$  приведены отношения основной частоты изгибных и крутильных колебаний к основной частоте продольных колебаний для затвердевшего бетона.

Таблица 1.5. Отношение между основной частотой и гармоникой в образцах бетона

Соотношение размеров образца	Колебания	Основная частота, $k = 1$	Гармоника 2, $k = 2$	Гармоника 3, $k = 3$
1 : 1 : 3	Продольные	1	1,95	2,71
	Изгибные	1	2,06	3,1
	Крутильные	1	2	3
1 : 1 : 4	Продольные	1	1,97	2,86
	Изгибные	1	2,21	3,5
	Крутильные	1	2	3
1 : 1 : 5	Продольные	1	1,99	2,95
	Изгибные	1	2,36	3,93
	Крутильные	1	2	3
1 : 1 : 6	Продольные	1	2	2,97
	Изгибные	1	2,44	4,19
	Крутильные	1	2	3

Таблица 1.6. Соотношение частот основного тона в образцах затвердевшего бетона ( $\nu_d = 0,25$ )

Соотношение размеров образца	Продольные колебания	Изгибные колебания	Крутильные колебания
1 : 1 : 3	1	0,53	0,59
1 : 1 : 4	1	0,43	0,58
1 : 1 : 5	1	0,36	0,58
1 : 1 : 6	1	0,31	0,58

## 1.5. ИЗМЕРЕНИЯ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

При вибрационном испытании бетонного образца часть энергии, сообщенной образцу, не реализуется в виде колебательной, поскольку бетон не является вполне упругим материалом и обладает поглощающими свойствами. Эта часть колебательной энергии является потерянной; она рассеяна в виде тепла, что вызвано силами трения, которые возникают при колебаниях в материале, в особенности по поверхности сцепления между заполнителем и цементным камнем.

Количественная характеристика затухания колебаний названа логарифмическим декрементом колебаний, при ее определении используется затухание собственных (свободных) колебаний образца. Уравнение движения системы с одной степенью свободы без затухания, подверженной собственным колебаниям, дано в общем виде выражением (1.2); добавим к нему член, который характеризует трение и зависит от скорости колебаний. Получим

$$m \ddot{x} + r \dot{x} + kx = 0, \quad (1.41)$$

где  $r$  — коэффициент неупругого сопротивления за счет вязкого трения (рис. 1.5).

Типичное решение уравнения (1.41) зависит от соотношения между тремя коэффициентами  $m$ ,  $r$ ,  $k$  или, точнее, от отношения  $\zeta$ :

$$\zeta = \frac{r}{r_c}, \quad (1.42)$$

где  $r_c$  — критический коэффициент неупругого сопротивления, равный

$$r_c = 2 \sqrt{km} = 2m\omega_n, \quad (1.43)$$

где  $\omega_n$  — круговая частота колебаний системы с учетом сопротивления.

Если  $\zeta < 1$ , что справедливо для бетона, то получаем общее решение в виде

$$x = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_a t + \theta), \quad (1.44)$$

где  $\omega_a$  — круговая частота колебаний системы без сопротивления,

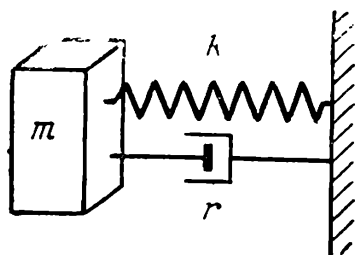


Рис. 1.5. Механическая система с одной степенью свободы, с сопротивлением

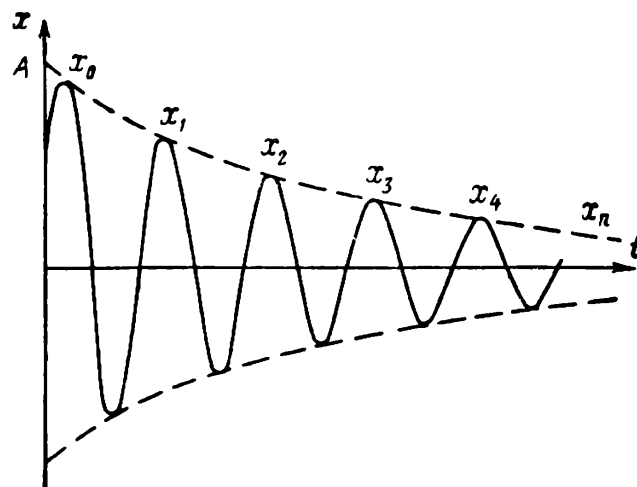


Рис. 1.6. Виброграмма свободных колебаний

в котором  $\delta$  [ $s^{-1}$ ] называется постоянной затухания и равна:

$$\delta = \frac{r}{2m}. \quad (1.45)$$

Решение (1.44) можно представить графически (рис. 1.6). Натуральный логарифм отношения двух последовательных значений амплитуд колебаний называется логарифмическим декрементом:

$$\Delta = \ln \frac{x_n}{x_{n+1}}. \quad (1.46)$$

Эта величина связана с постоянными, которые характеризуют движение, что следует из (1.44) и (1.46):

$$\Delta = \delta T_a = \frac{\pi r}{m\omega_a}, \quad (1.47)$$

где  $T_a$  и  $\omega_a$  — соответственно период и круговая частота колебаний системы без сопротивления.

Из соотношения для определения логарифмического декремента (1.46) следует, что он может быть выражен в функции количества колеба-

ний  $N$ ; для этого необходимо, чтобы амплитуда колебаний уменьшилась на половину от начального значения из условия

$$\Delta = \frac{\ln 2}{N}. \quad (1.48)$$

Один из двух способов измерения затухания колебаний связан с оценкой ширины резонансной кривой. При этом используются вынужденные колебания под действием внешней периодической вынуждающей силы. Для этого случая колебаний (рис. 1.7) уравнение движения (второй закон Ньютона) принимает вид

$$m \ddot{x} + r \dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t, \quad (1.49)$$

где  $\omega$  — частота внешней силы.

Решая уравнение (1.49), получим

$$x = \frac{F_0}{k} \cdot \frac{\sin(\omega t + \theta)}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(\frac{2\zeta\omega}{\omega_n}\right)^2}}. \quad (1.50)$$

Решение уравнения (1.50) получено для параллельного резонанса (резонанса токов) ( $\omega = \omega_n$ ) и графически изображено на рис. 1.8. Введем понятие добротности  $Q$ :

$$Q = \frac{1}{2\zeta} = \frac{f_n}{f_1 - f_2} = \frac{f_n}{\Delta f}, \quad (1.51)$$

которая показывает остроту кривой резонанса. Интервал  $\Delta f$  определяется одним из следующих условий:

а) амплитуда достигает уровня половины измеренной при резонансе величины:

$$A_{1,2} = \frac{A_{\max}}{2}; \quad (1.52)$$

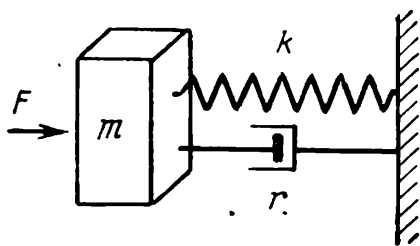


Рис. 1.7. Механическая система с одной степенью свободы, с сопротивлением, возбуждаемая внешней периодической силой

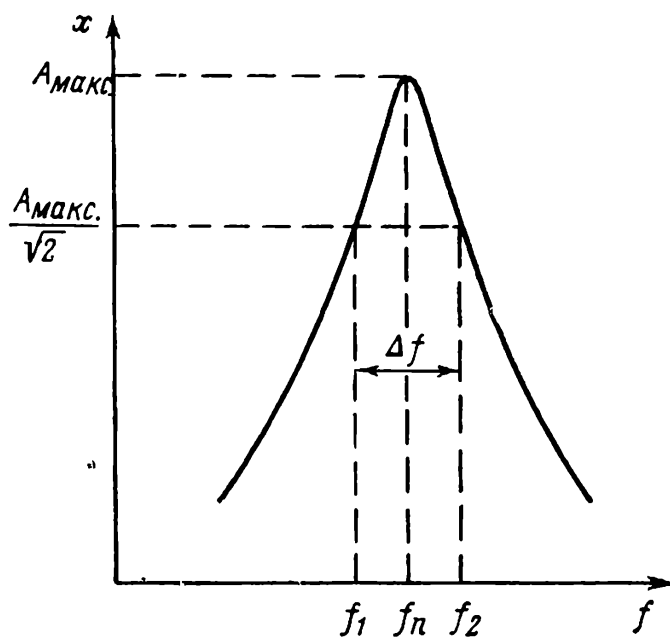


Рис. 1.8. Кривая вынужденных колебаний с затуханием

б) энергия снижается наполовину от величины, соответствующей резонансу. В этом случае энергия пропорциональна квадрату амплитуды, а величина амплитуды, на которой измеряется интервал  $\Delta f$ , будет:

$$A_{1,2} = \frac{A_{\text{макс}}}{\sqrt{2}}. \quad (1.53)$$

Критерий пункта «б» применяется чаще, поскольку на получаемые результаты меньше влияет соседний резонанс, который нарушает симметрию резонансной кривой.

Логарифмический декремент  $\Delta$  и добротность  $Q$  связаны между собой

$$\Delta = \frac{\pi}{Q}. \quad (1.54)$$

## 1.6. АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ

Составными элементами испытательной аппаратуры резонансного метода для бетона являются [5]: генератор звуковой частоты, усилитель мощности, излучатель звуковых колебаний, приемник звуковых колебаний, усилитель приемника с индикатором резонанса.

На рис. 1.9 приведена блок-схема аппаратуры, отдельные элементы которой изображены в виде последовательных блоков.

В соответствии с расположением аппаратуры, согласно рисунку, выход генератора соединяют через усилитель мощности с излучателем, который создает колебания в образце. Амплитуда колебаний образца может быть измерена по шкале прибора — индикатора напряжения или же тока после того, как колебания будут восприняты и преобразованы в напряжение приемником, а затем усилены в усилителе приемника.

Низкочастотный широкополосный генератор типа РС может покрывать различные резонансы. Как правило, для этого достаточен диапазон от 50 до 20 000 гц. Диапазон резонансных частот для типовых бетонных или растворных образцов приведен в табл. 1.7.

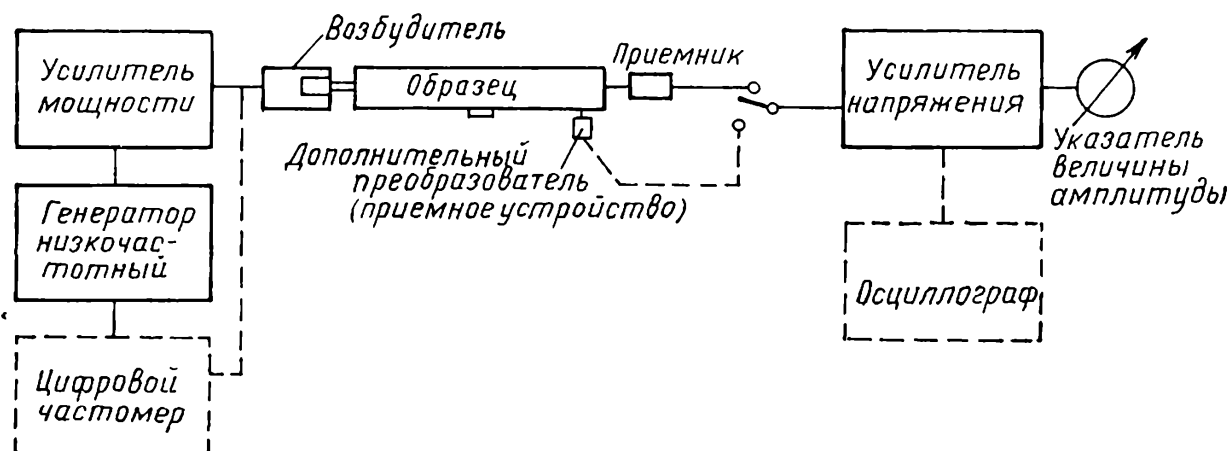


Рис. 1.9. Блок-схема аппаратуры для резонансных испытаний

Таблица 1.7. Область резонансных частот в бетонных образцах<sup>1</sup>

Размер образцов в см	Основная частота в гц		
	продольные колебания	изгибные колебания	крутильные колебания
20×20×80	1700—2000	700—800	1000—1200
10×10×55	3200—3700	1000—1300	1700—2100
10×10×40	3400—4000	1200—1500	1900—2300
10×10×30	6000—7000	3200—3600	3600—4100
4×4×16	9000—11000	3600—4500	5300—6400
Цилиндр $\varnothing = 15$ , $h = 30$	6000—7000	3000—4000	3600—4200

<sup>1</sup> Таблицу 1.7 следует рассматривать как сводку приблизительных данных, так как в зависимости от вида бетона граничные частоты могут существенно смещаться (примеч. науч. ред.).

При резонансных испытаниях точность измерения частот должна быть порядка 0,5%, хотя во многих случаях можно принимать точность 1% [6]. Ошибки в определении динамического модуля упругости необходимо принимать равными двойным ошибкам при измерении соответствующих частот.

При выборе генератора колебаний основную роль играет стабильность диапазона частот в процессе работы и, в частности, отклонения нулевого отсчета в аппарате при нагревании. Ошибка калибровки генератора не должна превышать 0,5%. Ошибка в считывании частот по круговой шкале должна быть меньше 0,5%. Напряжение выхода излучателя должно быть регулируемым и изменяться не больше чем на 10 в при изменении частот в пределах  $\pm 20\%$ . При желании повысить точность измерения параллельно с излучателем подключают цифровой частотомер, по которому отсчитывают показания с точностью до 1 гц и даже его долей. Этот частотомер показан на схеме 1.9 и является очень эффективным при измерении затухания по методу оценки ширины резонансной кривой.

Мощность на выходе большинства генераторов звуковой частоты недостаточна. Поэтому для обеспечения соответствующей работы излучателя между ним и генератором предусматривается усилитель мощности с мощностью на выходе 4—5 вт. В других случаях полезно осуществить выбор усилителя мощности таким образом, чтобы выход усилителя соответствовал импедансу  $Z$  излучателя в частотном интервале, в котором он работает. Одним из типов излучателя является плоский излучатель в виде катушки с подвижным сердечником, работающим на переменный импеданс в слышимой области частот с сопротивлением около 3 ом для низкой частоты и для высокой частоты 10—12 ом. В этих условиях осуществляется три выхода с сопротивлением, равным 3, 6 и 10 ом, которые обеспечивают хорошую связь усилителя и излучателя для всех частотных полос. Когда в усилителе располагают одним выходом, соответствующий импеданс излучателя должен соответствовать частоте 1000 гц.

В качестве эффективного возбудителя колебаний рекомендуется электродинамический с катушкой и подвижным сердечником, с относительно небольшим потреблением мощности и незначительной возбуждающей силой, что очень ценно при испытании на колебания образцов малых размеров (рис. 1.10, а и б).

Катушка возбуждителя с подвижным сердечником, соединенным с наконечником, передает колебания образцу. Передача колебаний образцу производится посредством дополнительной детали, которая имеет хороший контакт с бетонной призмой. Магнитная часть излучателя не имеет связи с катушкой, таким образом допускается взаимное смещение оси катушки и магнитного сердечника.

Существуют также возбуждители с катушками и подвижным сердечником, которые передают колебания образцу не с помощью непосредственного контакта, а бесконтактным методом с помощью электродинамического вибратора с воздушной подушкой (рис. 1.10, в). В таком случае образцу передается незначительное количество энергии, однако к образцу не присоединяется дополнительная масса.

Когда пользуются непосредственным контактом, то масса катушки с сердечником и наконечником вибратора должна составлять меньше 0,2 массы образца. В любом варианте необходимо, чтобы излучатель не имел резонанса в области измеряемых частот.

Приемник может быть одного из следующих типов (рис. 1.11):

пьезоэлектрический акселерометр с кристаллом, который достаточно прост для применения непосредственно на образце или может быть закреплен самостоятельно и поддерживать связь с балкой путем легкого соединения (рис. 1.11, а);

приемник типа микрофона, у которого наконечник опирается на образец и соответствует направлению колебаний;

приемник электромагнитного типа, подобный применяемому в телефоне, состоящий из двух частей: диска из ковкого железа или другого магнитного металла, приклеенного к образцу, и магнитного приемника, расположенного вблизи диска, но без касания (рис. 1.11, б).

Излучатели и приемники для соблюдения контакта с образцом должны опираться на ровную или закругленную поверхность таким образом, чтобы материал в этом месте не разрушался во время испытания.

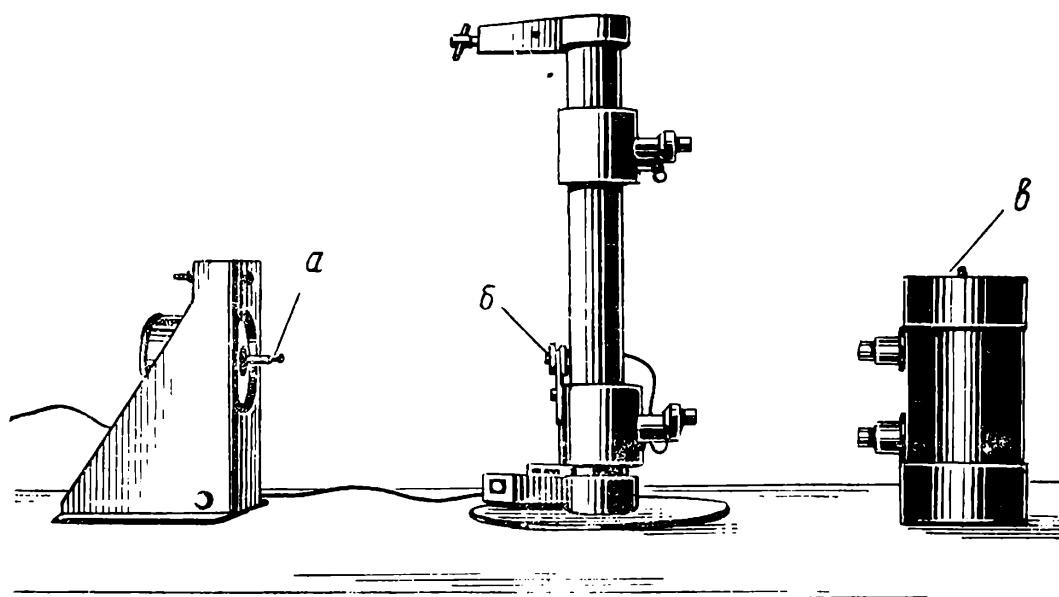


Рис. 1.10. Возбудители колебаний

Может быть использован любой из этих приемников, необходимо только, чтобы его колеблющаяся масса была меньше 0,2 от массы образца и чтобы его собственная частота не была близка частотам диапазона 50—20 000 гц.

Усилитель приемника — один из обычных линейных усилителей напряжения с коэффициентом усиления приблизительно равным  $a = 10^5$ . Необходимо, чтобы максимум сигнала на выходе излучателя был постоянным и устойчивым в пределах  $a \pm 0,5\%$  на ширину полосы в 5% главной частоты. Также необходимо, чтобы максимальная чувствительность была бы по отношению к сигналу больше 40 дб. Желательно иметь на выходе усилителя измеритель напряжения, который можно использовать в качестве индикатора резонанса путем наблюдения максимального значения напряжения.

К схеме применяемой аппаратуры следует добавить описанные выше эффективные приборы, а именно:

дополнительный звукосниматель, указанный на рис. 1.9, для уточнения тона резонанса. Он устанавливается вдоль образца и контролирует положение пучностей и узлов колебания;

дополнительный индикатор резонанса, в качестве которого можно использовать осциллоскоп (электронно-лучевую трубку) одной из пар отклоняющих пластинок, связанный с сигналом излучения, и другой — с сигналом приемника и усилителя. Форма интерференционных фигур Лиссажу на экране электронно-лучевой трубки помогает различать гармоники колебаний образца;

дополнительный измеритель частот, соединенный параллельно с генератором колебаний, обычно цифровой, позволяет измерять резонансные частоты с точностью до 1 гц или его долей.

Для измерения коэффициента затухания по ширине резонансной кривой применяется также аппаратура, имеющая на шкале вольтметра резонансного индикатора отметку, равную 0,707 максимального отклонения амплитуды и обеспечивающая возможность регулирования отсчетов с помощью потенциометра.

Применение метода измерения логарифмического декремента при свободных колебаниях предполагает наличие дополнительной блокировки аппаратуры, называемой анализатором логарифмического декремента (амплитуды затухающих колебаний). Эта аппаратура возбуждает непрерывное периодическое колебание образца и служит для количественного подсчета периодов с помощью числового частотомера, на котором осуществляется счет колебаний до тех пор, пока амплитуда колебаний не уменьшится наполовину от начального значения. Точность подсчета должна быть не меньше 1 цикла.

На рис. 1.12 показана в качестве примера аппаратура, изготавливаемая для измерения резонансным методом в Румынии, марки I.S.P.H. INCERC (Институт исследований и экономики строительных конструкций), а также аппаратура, изготавливаемая в зарубежных странах<sup>1</sup>, например электроди-

---

<sup>1</sup> В Советском Союзе для резонансных испытаний образцов бетона выпускаются серийный прибор ИРЧ-1 (измеритель резонансной частоты) и ряд других (примеч. науч. ред.).



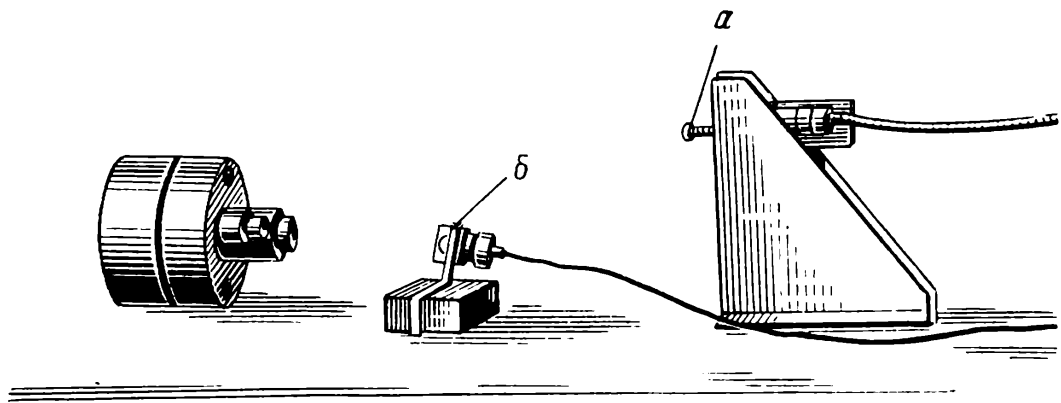


Рис. 1.11. Приемники колебаний

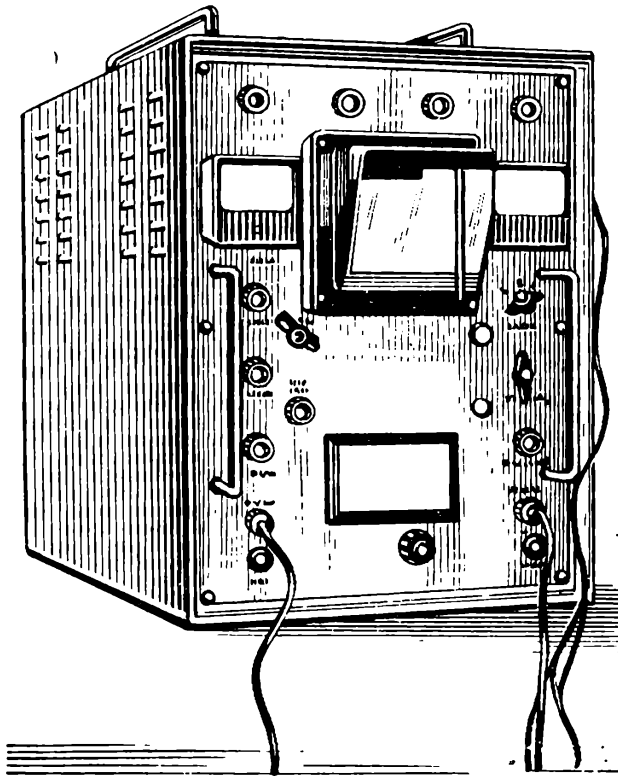
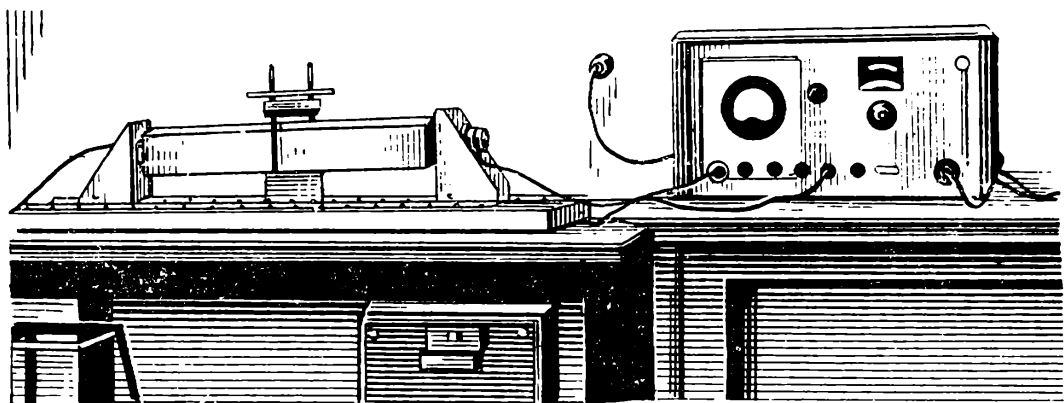


Рис. 1.12. Резонансный прибор ISPН

Рис. 1.13. Резонансный прибор Dawe



намический испытатель материалов типа SCT/5 или EDT/6, изготавливаемый фирмой «Доу» (Великобритания) (рис. 1.13); можно указать также прибор E — G Metr Kottas, изготавливаемый фирмой WTW — Weilheim R. F. в ФРГ. Последний аппарат позволяет измерять также скорости распространения ультразвукового импульса на небольших образцах (меньше 30 см).

## 1.7. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА

Резонансные методы применяются в научных исследованиях главным образом на образцах для определения динамических упругих постоянных бетона при изучении таких процессов, как твердение бетона, а также для определения влияния условий твердения на процесс набора прочности. Резонансные методы были использованы при исследовании поведения бетона при воздействии агрессивных химических агентов и главным образом при попеременном замораживании-оттаивании при испытании бетона на морозостойкость. Следует сказать, что имеется попытка использования резонансного метода для определения механической прочности бетона на образцах или для общей оценки качества бетона в конструктивных элементах, как, например, шпал из предварительно-напряженного железобетона для железной дороги или сборных железобетонных свай при забивке в грунт.

### 1.7.1. Исследование процессов твердения бетона

Резонансные методы применяются для контроля твердения бетона в возрасте 1—15 суток. Для возраста бетона меньше 1 суток резонансные методы малопригодны, так как возникшие колебания образца приводят к разрушению при длительных испытаниях. Для бетона в возрасте 15 суток и выше изменения собственных частот или затухания незначительны, поэтому при экспериментальных измерениях возникают значительные погрешности.

Для установления возраста бетона, влияющего на возбуждение в нем изгибных колебаний определенной частоты, испытывались бетонные образцы очень раннего возраста, начиная с 8 ч с момента изготовления. Эти образцы изготавливали из цемента с высокой начальной прочностью.

Результаты исследования выполнены в INCERC [7] на призме  $10 \times 10 \times 55$  см.

Путем периодических резонансных измерений в ходе процесса твердения бетона определено, что окончательная фаза твердения проходит между 11—12 ч с момента затворения. Установление предельных границ производилось с помощью так называемой теории связанной точечной системы [7]\*, на основании которой показано, что в момент прохождения процесса твердения от одной фазы к другой на диаграмме изменения собственной частоты колебаний появляется характерная зона, названная зоной точечных элементов. Для облегчения представления эта зона может быть заменена точкой, находящейся на пересечении продолжения прямых, проведенных из крайних точечных элементов, за пределами которых происходил процесс

\* Теория связанной точечной системы кратко изложена автором в [7] и не является общеизвестной (примеч. науч. ред.).

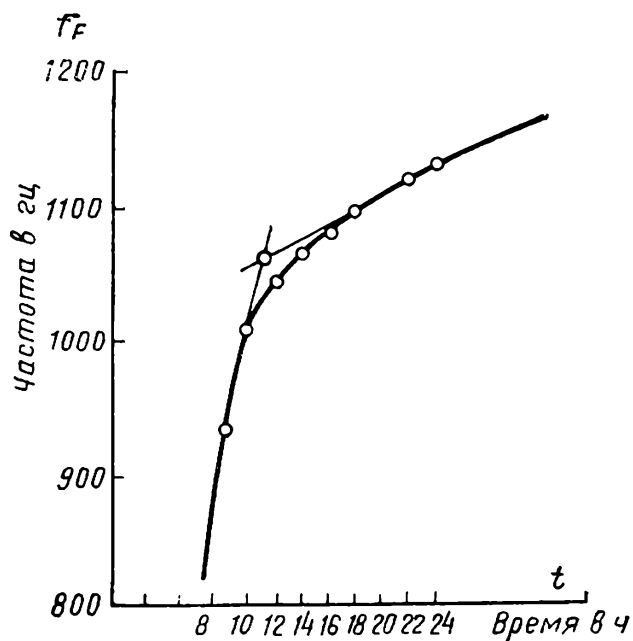


Рис. 1.14. Изменение собственных частот изгибных колебаний бетонного образца в период между 8 и 24 ч с момента изготовления

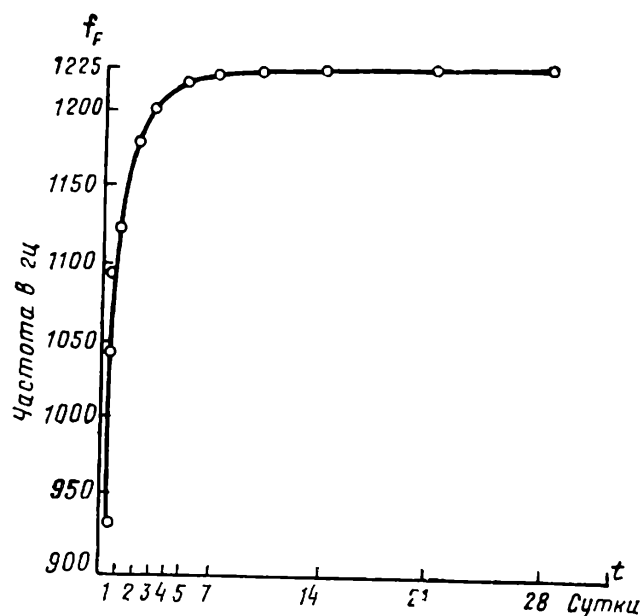


Рис. 1.16. Изменение собственной частоты изгибных колебаний во времени бетона в возрасте 1—28 суток, приготовленного на быстротвердеющем цементе

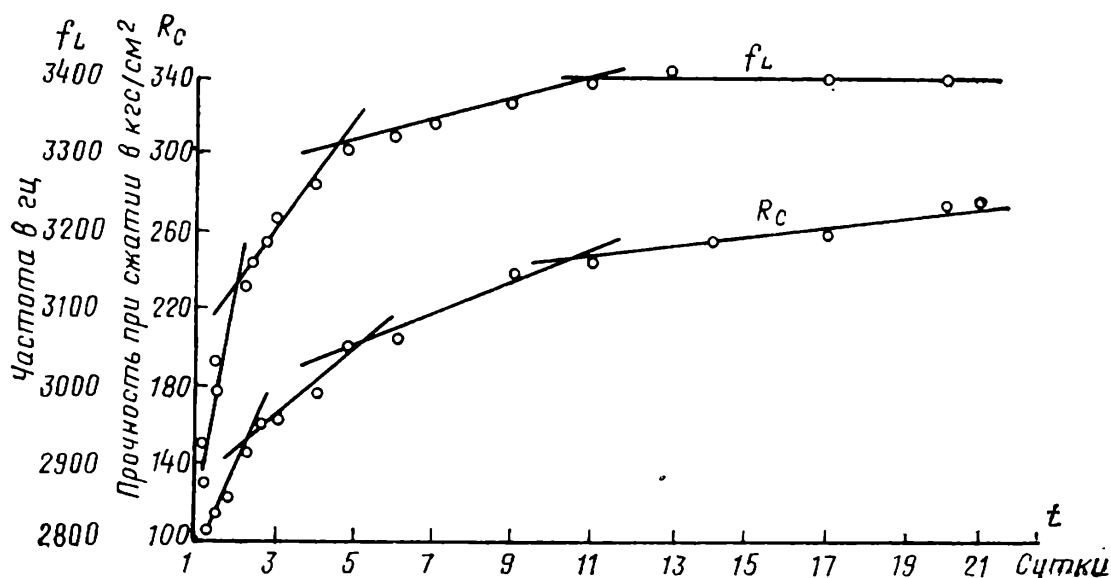


Рис. 1.15. Изменение собственной частоты продольных колебаний и прочности в кгс/см² во времени

твердения до и после зоны точечных элементов (рис. 1.14). Эти точечные элементы соответствуют аналогичным точкам на диаграмме скорости распространения волн ультразвука и другим типам аномалий на диаграмме изменения прочности при сжатии. Определение процесса твердения, которое соответствует этой фазе, остается еще нерешенной проблемой.

Контроль процесса твердения бетона в возрасте 11—12 ч с момента приготовления — не единственная задача, которая может быть решена с помощью резонансного метода.

На рис. 1.15 показаны результаты испытания бетонного образца  $10 \times 10 \times 55$  см, приготовленного на портландцементе марки 400 (PZ400) в возрасте от 1 дня на продольные колебания. Параллельно были испытаны кубы со стороной 10 см на разрушающую нагрузку при сжатии.

Точечные элементы, расположенные в местах перелома на обеих кривых диаграммы, соответствуют возрастам образцов с момента изготовления, равным 2, 5 и 11 суткам. Эти точки встречаются на диаграмме там, где изменяется резонансная частота и прочность при сжатии, и соответствуют теоретическим соображениям, изложенным в главе 2, а скорость распространения ультразвука указывает на то, что структурообразование тесно связано с ростом во времени механической прочности бетона. Положение точечных элементов отклоняется от значений аналитических данных в функции « $f_L-t$ », главным образом в результате изменения температуры твердения, водоцементного отношения, состава и тонкости помола цемента. Подробнее эти зависимости излагаются в главе 3.

Контроль процесса твердения, который продолжается за пределами 10—20 суток после приготовления бетона (рис. 1.16), для резонансного метода является более сложной задачей вследствие незначительного изменения частоты.

### 1.7.2. Исследование влияния влажности на твердение бетона

Условия твердения оказывают решающее влияние на изменение во времени механической прочности бетона. В первой части этого раздела излагаются исследования, выполненные в INCERC [8] и относящиеся к влиянию влажности на твердение бетона, приготовленного на цементе с высокой начальной активностью (минералогический состав:  $C_3S$  — 44%,  $C_2S$  — 24%,  $C_3A$  — 12%,  $C_4AF$  — 11%). Для исследования был принят способ возбуждения изгибных колебаний на призмах размером  $10 \times 10 \times 55$  см, из которых одна хранилась на воздухе ( $U_m = 40\%$ ), другая — постоянно под влажным песком ( $U_m = 100\%$ ). Изменения во времени частот собственных колебаний образцов даны в виде двух кривых, изображенных на рис. 1.17. Разность этих частот, изменяющаяся во времени, показана на рис. 1.18. При рассмотрении рис. 1.18 можно сделать вывод, что на части кривой имеется существенная разница между твердением двух образцов бетона (около 80—90%) в интервале первых 4—5 суток с момента приготовления.

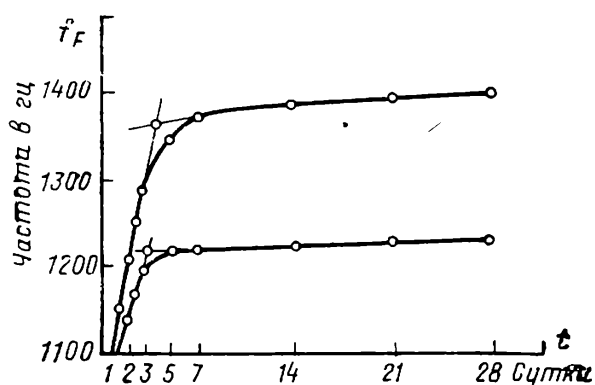


Рис. 1.17. Изменения во времени частот собственных изгибных колебаний образцов квадратного сечения при различных условиях влажности

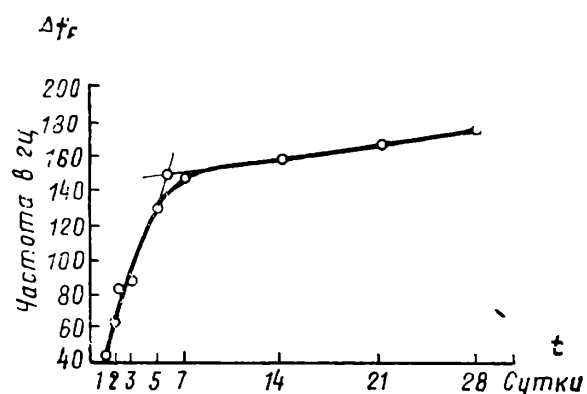


Рис. 1.18. Прирост во времени частоты собственных изгибных колебаний бетонного образца при его твердении

В этот период, по-видимому, наиболее интенсивно развивается химический процесс гидратации и усадки бетона, приготовленного из цемента с высокой начальной активностью. Затем, продолжая непрерывно развиваться, процесс протекает медленно и влажность имеет второстепенное значение для твердения этого бетона, во всяком случае для химического процесса старения геля, для которого влажность играет важную роль.

Из этого следует практический вывод, что для бетонов, приготовленных на быстрохватывающемся цементе, повышенная влажность во время твердения имеет важное значение во время хранения в первые 4—5 суток с момента изготовления. Это тот промежуток времени, в течение которого нужна эффективная защита бетона от потери воды, например путем полива, как это делается в Румынии в жаркое и сухое время года.

Изменение динамического модуля упругости показано на рис. 1.19 и 1.20. Эти данные сопоставимы с результатами, полученными Шефдевилем в 1953 г. в условиях различной влажности при схватывании цемента<sup>1</sup>. Образцы, изготовленные на портландцементе, сохранялись в трех различных режимах: непрерывно в воде (300 суток), непрерывно на открытом воздухе (300 суток) и 150 суток на открытом воздухе, а затем 150 суток в воде, после чего подвергались испытаниям. Результаты Шефдевиля приведены на рис. 1.20 в виде графиков изменения динамических модулей упругости во времени.

Из приведенных зависимостей видно, что динамический модуль упругости образца, хранившегося на воздухе, в первые 20 суток увеличивался, затем начал снижаться и в возрасте более 100 суток имел предельное значение. Это снижение происходило в процессе разрушения структуры бето-

<sup>1</sup> Обширные эксперименты с использованием резонансного метода были проведены В. А. Латишенко в 1955—1957 гг. по изучению влияния водонасыщения на свойства бетона. См. «Зависимость частоты собственных колебаний, динамического модуля упругости и логарифмического декремента затухания бетона от водонасыщения». — В кн.: Исследования по бетону и железобетону, вып. 2. Изд. АН Латв. ССР, Рига, 1957 (примеч. науч. ред.).

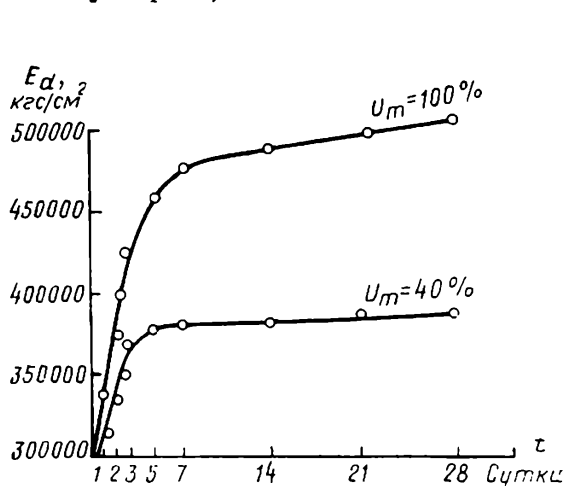


Рис. 1.19. Изменение во времени динамического модуля упругости бетона на быстрохватывающемся цементе при различной влажности

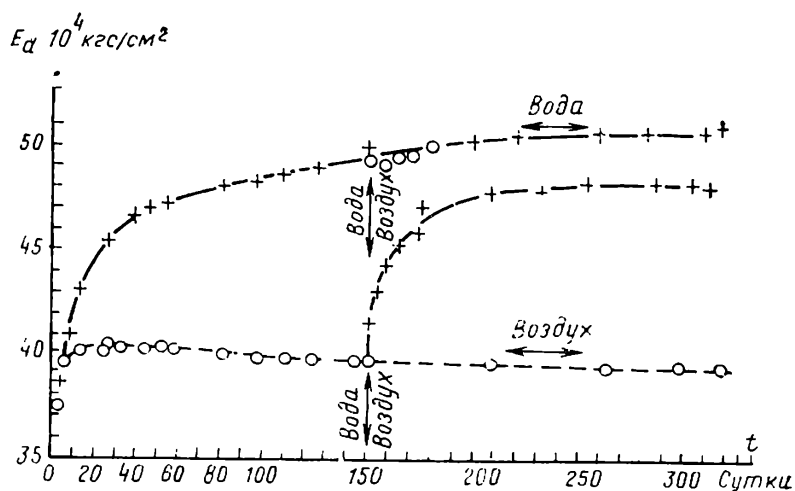


Рис. 1.20. Изменение во времени динамического модуля упругости бетона, приготовленного на портландцементе (по Шефдевилю)

на за счет образования микротрещин от усадочных напряжений. Динамический модуль упругости образца, хранившегося в воде, был приблизительно на 20—25% больше модуля образца, хранившегося на воздухе.

Усадка образца, находившегося в воде, не вызвала изменений свойств бетона. Наоборот, при погружении в воду образца, хранившегося на воздухе, выяснилось, что модуль его упругости быстро увеличивался, но не достиг того значения модуля упругости, который был у образца, непрерывно хранившегося в воде. Очевидно, качество первого образца понизилось в результате разрушения структуры во время хранения на воздухе; это явление необратимо, и полного залечивания микротрещин в воде не может быть.

### 1.7.3. Определение динамического модуля упругости и его связь со статическим модулем упругости<sup>1</sup>

Под динамическим модулем упругости нами понимается отношение напряжения к деформации на уровне напряжений предельно малых величин при воздействии динамической нагрузки. Вычисление производится после испытаний резонансным методом по одному из уравнений (1.20) или (1.33) в зависимости от использования продольных или изгибных колебаний.

Наиболее простое соотношение (1.20), поправочные коэффициенты  $c_L$  — небольшие, техника испытания проста и предпочтительна по сравнению с методом резонанса изгибных колебаний.

Величина динамического модуля упругости зависит от состава бетона, а именно: происхождения и зернового состава заполнителя, типа и дозировки вяжущего, количества воды, плотности бетона, а также от возраста и условий хранения или термообработки. Влияние заполнителя на модуль упругости бетона показано в табл. 1.8.

Из анализа данных табл. 1.8 можно сделать вывод, что модуль упругости бетона зависит от вида заполнителя, а также от разницы модулей упругости бетона и заполнителя, на котором он приготовлен, последний имеет более высокий модуль упругости<sup>2</sup>. В данном случае подтверждается, что здесь играет роль целый ряд свойств компонентов бетона.

Увеличение мелких фракций заполнителя приводит к уменьшению динамического модуля упругости бетона и соответственно также его прочности (рис. 1.21).

Марка и дозировка цемента незначительно влияют на динамический модуль упругости, но влияют на механическую прочность бетона [9].

Водоцементное отношение и плотность бетона оказывают сильное влияние на величину динамического модуля упругости вследствие изменения пористости [10]. На рис. 1.22, по данным Маккензи [11], показано влияние относительной плотности ( $\rho_a$  — плотность пористого материала;  $\rho$  — плотность сплошного материала) на отношение модулей упругости материала

<sup>1</sup> Связь динамического и статического модуля упругости бетона неоднократно изучалась советскими исследователями как в теоретическом плане, так и в экспериментальном. См. работы Н. А. Крылова (ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского), В. Н. Морщина, В. Е. Гринберга, В. В. Судакова (ЛенЗНИИЭП) (примеч. науч. ред.).

<sup>2</sup> Для легкого бетона этот вывод не подтверждается, что видно из данных последней строки табл. 1.8 (примеч. науч. ред.).

30 Таблица 1.8. Связь модуля упругости заполнителя и бетона

Бетон	Зерновой состав заполнителя в мм			E <sub>зап</sub> дин, кгс/см <sup>2</sup>	E <sub>бет</sub> дин, кгс/см <sup>2</sup>
	0—3	3—7	7—30		
На речном гравии	Речной песок 28%	Речной гравий 22%	Речной гравий 50%	900 000	370 000
На баритовом заполнителе	Речной песок 21%	Баритовый запол- нитель 25%	Баритовый запол- нитель 54%	470 000	270 000
На сидеритовом заполнителе	Речной песок 26%	Сидеритовый за- полнитель 23%	Сидеритовый запол- нитель 51%	1 140 000	430 000
На серпентиновом заполнителе	Серпентиновый песок 25%	Серпентиновый за- полнитель 19%	Серпентиновый заполнитель 56%	420 000	220 000
На андезитовом заполнителе	Андезитовый песок 40%	Андезитовый за- полнитель 18%	Андезитовый запол- нитель 42%	1 100 000	440 000
На керамзитовом заполнителе	Керамзитовый песок 25%	Керамзитовый заполнитель 36%	Керамзитовый заполнитель 39%	43 000	114 000

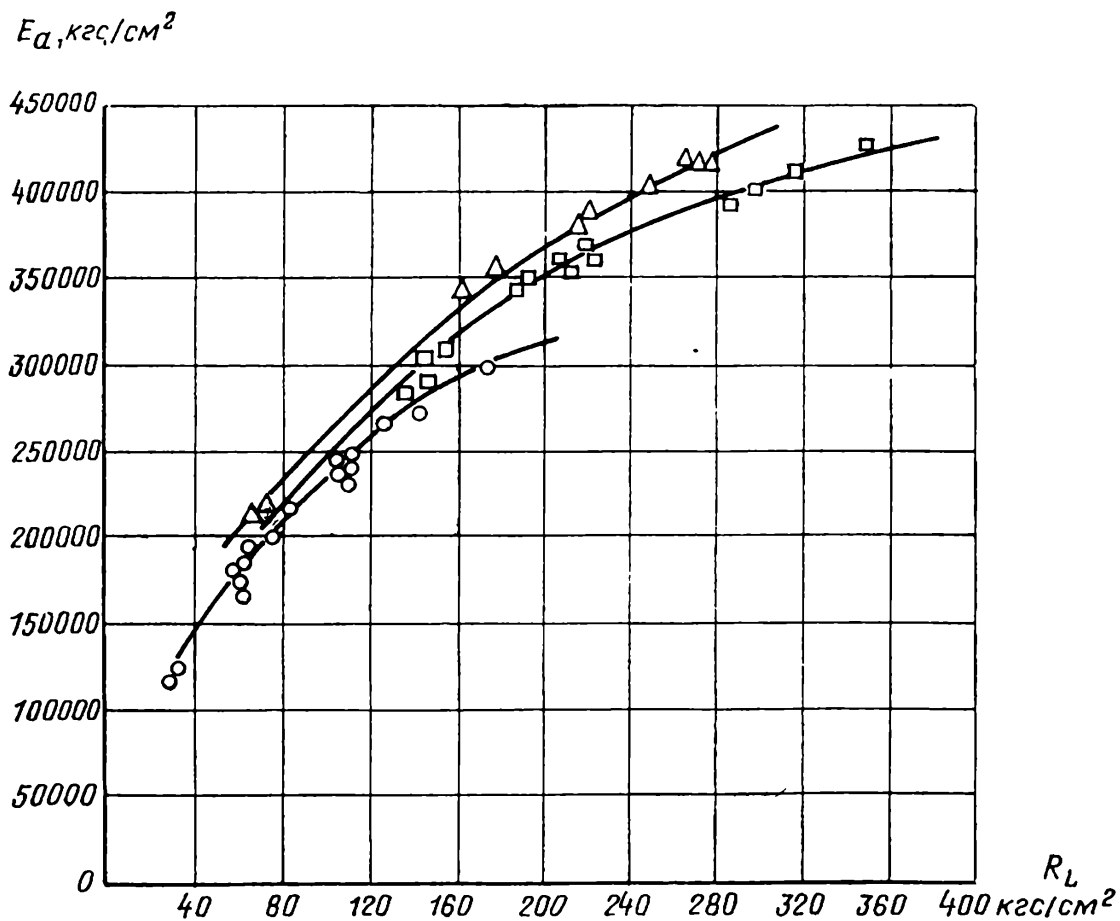


Рис. 1.21. Влияние мелкой фракции заполнителя на динамический модуль упругости бетона

○ — зерновой состав F; □ — зерновой состав E; △ — зерновой состав D

с порами  $E_a$  и без пор E. Из графика видно, что отношение модулей снижается приблизительно в 2 раза быстрее, чем пористость.

Оценка влияния способа уплотнения и термообработки бетона приводится в табл. 1.9. Из данных, приведенных в таблице, следует, что энергичное уплотнение с помощью центрифуги увеличивает плотность до 25% (эквивалентно приросту прочности до 50%); известно также, что применение термообработки приводит к уменьшению модуля, значение которого снижается на 10—20%. Кроме того, на основании двух примеров видно, что между снижением модуля и прочностью не существует взаимосвязи.

Таблица 1.9. Влияние способа уплотнения и термообработки бетона

Способ уплотнения	Условия твердения	$R_c$ , кг/см <sup>2</sup>	$E_d$ , кг/см <sup>2</sup>
Трамбовка вручную	По стандарту ASTM	300	387 000
	Термообработка 1	260	347 000
	» 2	250	305 000
Центрифугирование	По стандарту ASTM	450	488 000
	Термообработка 1	415	425 000



Влияние условий хранения и созревания бетона на значения динамического модуля упругости приведено на рис. 1.23. Из графика видно, что для бетона, хранившегося на открытом воздухе, динамический модуль упругости в основном увеличивался в течение 3 суток, а для бетона, погруженного в воду, — в течение 7 суток.

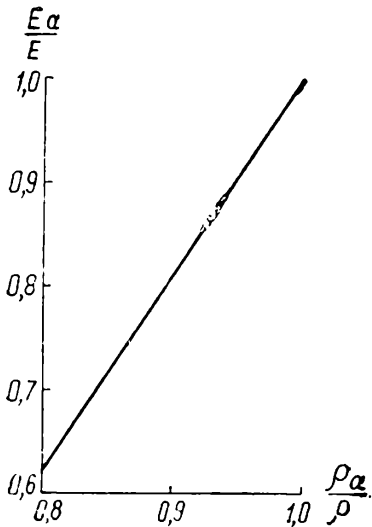
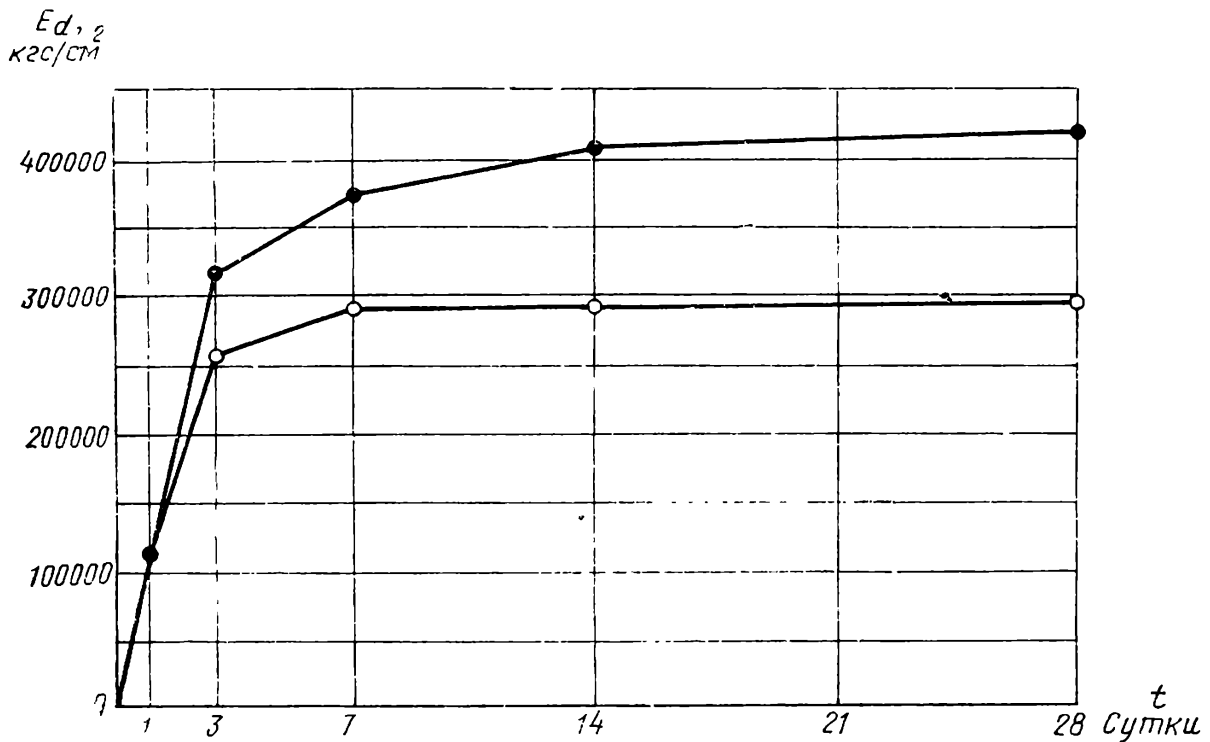


Рис. 1.22. Влияние плотности бетона на динамический модуль упругости

Рис. 1.23. Влияние условий хранения и возраста бетонных образцов на динамический модуль упругости  
● — хранение в воде; ○ — хранение на открытом воздухе



Модуль упругости бетона в возрасте 28 суток, погруженного в воду, можно принимать на 25—30% больше, чем модуль упругости бетона, хранившегося на открытом воздухе.

Между статическим и динамическим модулем упругости существует связь, которая является более простой для относительно плотных материалов, подвергающихся воздействию малых нагрузок в течение очень короткого времени.

Если условиться, что значение статического модуля упругости определяет тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат до

точки, соответствующей выбранному уровню напряжений на кривой деформирования бетона (так называемый секущий модуль), то между двумя модулями существует соотношение в общем виде:

$$E_{st} = \alpha E_d, \quad (1.55)$$

в котором коэффициент  $\alpha$  зависит от напряжения  $\sigma_{st}$ .

При очень малых напряжениях ( $\sigma \rightarrow 0$ )  $E_{st}$  определяется экстраполированием кривой на рис. 1.24 к нулю напряжений, тогда

$$\alpha = 1. \quad (1.56)$$

Величина  $\alpha$  не зависит от состава и условий твердения бетона, а также от вида нагрузки сжатия или изгиба. Для констатации этого факта в табл. 1.10 (колонки 3 и 5) даны для сравнения значения двух модулей упругости. Мы видим, что идентичность почти полная, т. е. подтверждается независимость к перечисленным выше условиям. Для материалов, имеющих большее, чем бетон, основание считается упругими, таких, как горные породы или сталь, эта идентичность остается до разрушения (или до предела пропорциональности). Бетон как материал, который подвергается вязкопластическим деформациям, даже при незначительных нагрузках такую идентичность теряет быстро. В этих условиях коэффициент  $\alpha$  принимают таким, чтобы значения  $E_{st}$  были тем меньше, чем напряжение  $\sigma$  больше, так как рост нагрузки определяет развитие вязко-пластических деформаций (сжатие обыкновенного бетона). Для тех бетонов, которые по составу и условиям укладки в сооружение обладают повышенными вязкопластическими свойствами,  $\alpha$  берут близким к предельным значениям, приведенным в табл. 1.11.

Значения  $\alpha$  выше  $\frac{\sigma}{R} = 0,6$  обычно не используются, поскольку они в значительной степени зависят от скорости испытания и других параметров, которые влияют на развитие пластических деформаций. Разделение бетонов на плотные и пластичные является условным; этим подчеркиваются

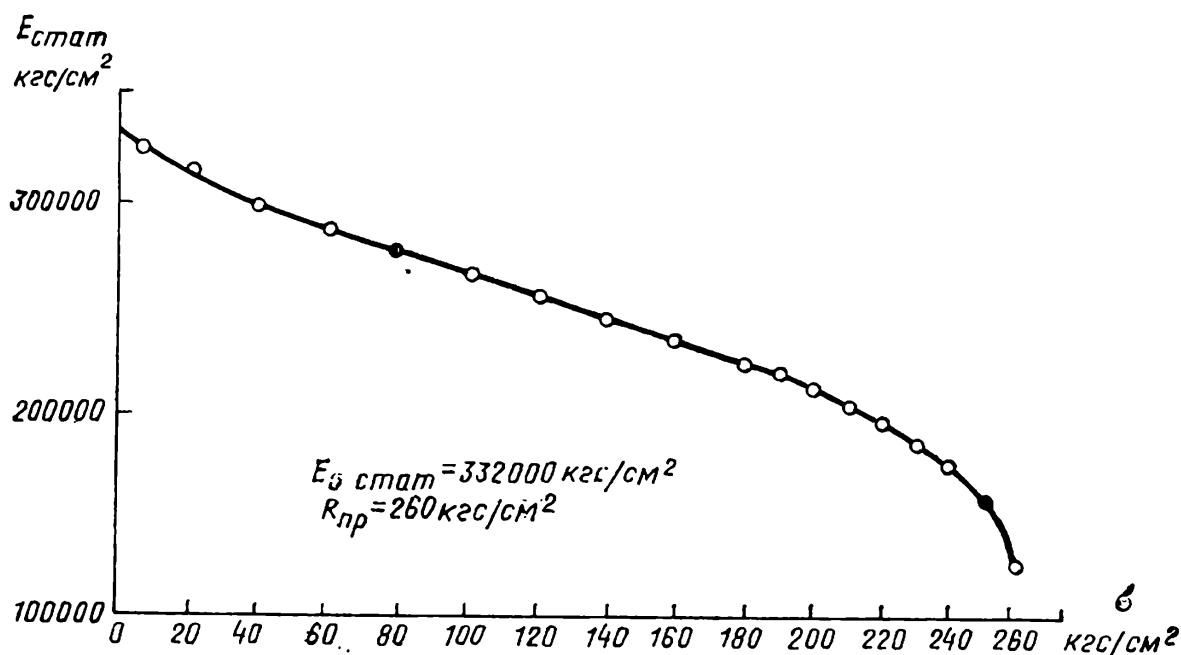


Рис. 1.24. Изменение секущего модуля упругости в функции напряжений в бетоне

Таблица 1.10. Статические и динамические модули упругости бетонов

Бетон	$R_{дп}$ ( $R_{изг}$ ), кгс/см <sup>2</sup>	$E_d$ , кгс/см <sup>2</sup>	Напряженное состояние	$E_{st}^0$	$E_{st}^{0,5}$ кгс/см <sup>2</sup>	$E_{st}^{разр}$
На речном гравии	(46)	420 000	Сжатая зона при изгибе	408 000	342 000	270 000
На андезитовом заполнителе	(50)	454 000	Растянутая зона при изгибе	410 000	338 000	210 000
			Сжатая зона при изгибе	450 000	420 000	360 000
На баритовом заполнителе	280	270 000	Растянутая зона при изгибе	460 000	410 000	290 000
			Сжатая зона при изгибе	275 000	245 000	165 000
Односуточного возраста при 5° С	15	112 000		—	—	—
Бетон двухсуточного возраста	150	254 000		250 000	210 000	750 000
Бетон семисуточного возраста	230	290 000		292 000	224 000	108 000
Бетон 14-суточного возраста	300	290 000		291 000	230 000	100 000
Бетон 28-суточного возраста	310	297 000		295 000	235 000	95 000
Трамбованный вручную, хранение по ASTM	295	380 000	Сжатие	360 000	265 000	121 000
Трамбованный вручную и термообработка	255	305 000		305 000	235 000	120 000
Бетон центрифужированный, хранение по ASTM	455	488 000		470 000	410 000	306 000
Центрифужированный и термообработка	410	425 000		435 000	395 000	255 000

Таблица 1.11. Значения коэффициента  $\alpha$

$\frac{\sigma_l}{R_{pr}} \left( \frac{\sigma_t}{R_i} \right)$	Сжатие бетона		Изгиб			
	плотного	пластичного	сжатая зона бетона		растянутая зона бетона	
			плотного	пластичного	плотного	пластичного
0	1	1	1	1	1	1
0,33	0,92	0,82	0,96	0,92	0,94	0,9
0,6	0,85	0,68	0,92	0,84	0,87	0,78
1	0,65	0,34	0,8	0,67	0,63	0,5

только предельные значения, между которыми может изменяться коэффициент  $\alpha$  в функции состава, плотности и условий хранения бетона.

Если вместо полного модуля деформаций бетона определять упругий модуль деформации при заданном уровне напряжений, полученный на основании достаточно большого количества циклов нагружения-разгружения, и при условии, что деформации стабилизируются в результате исчерпания всех вязкопластических свойств, тогда можно получить совпадение обоих модулей — статического и динамического, как в случае совершенно упругого материала при любых напряжениях в нем.

#### 1.7.4. Определение динамического коэффициента Пуассона и его связь со статическим коэффициентом Пуассона

Определение динамического коэффициента Пуассона можно выполнить исключительно с помощью резонансного метода, используя сочетание двух видов колебаний. К числу наиболее часто применяемых и наиболее простых комбинаций резонансных методов относятся методы продольных и крутильных колебаний. Для этой цели особенно удачным был бы выбор образца ( $l \geq 4a$ ) с квадратным сечением. Применение двух видов резонанса позволяет определить две упругие постоянные: динамический модуль упругости  $E_d$  и динамический модуль сдвига  $G_d$ , связанные между собой динамическим коэффициентом Пуассона  $\nu_d$ , который определяется следующим соотношением классической теории упругости [12]:

$$\nu_d = \frac{E_d}{2G_d} - 1. \quad (1.57)$$

Если в (1.57) заменим значения  $E_d$  и  $G_d$  соответственно выражениям (1.12) и (1.37) с введением поправки по (1.39), получим

$$\nu_d = 0,42 \left( \frac{f_{L_1}}{f_{T_1}} \right)^2 - 1, \quad (1.58)$$

где  $f_{L_1}$  и  $f_{T_1}$  — основные частоты продольных и крутильных колебаний.

Трудности при определении резонанса крутильных колебаний, связанные с определением коэффициента Пуассона, становятся меньшими, если применить комбинированный метод, используя резонансную частоту про-

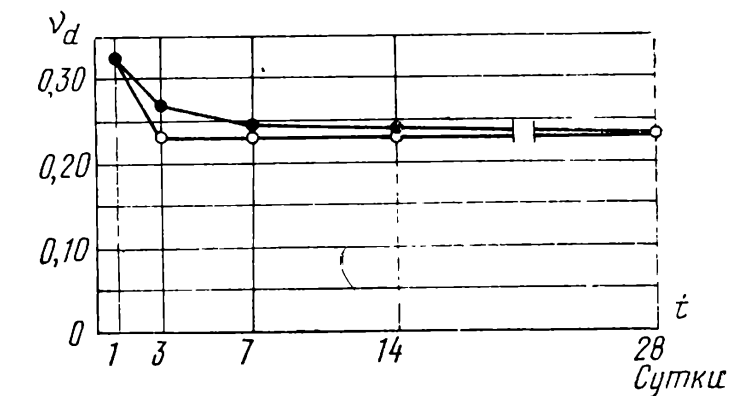
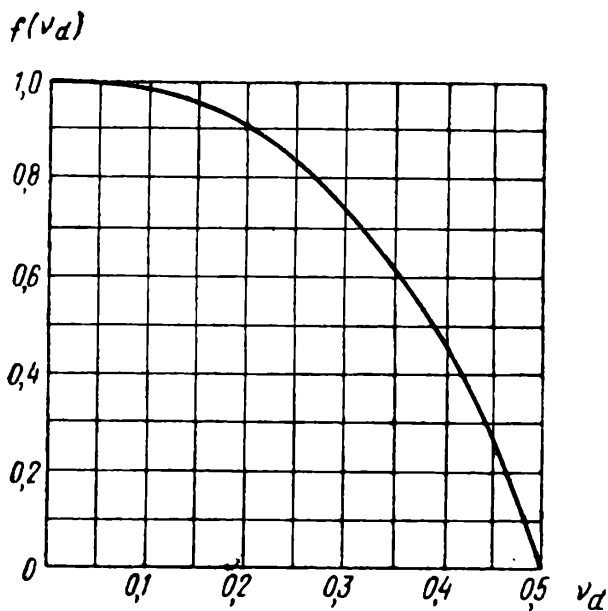


Рис. 1.26. Изменение динамического коэффициента Пуассона с возрастом бетона  
● — хранение в воде; ○ — хранение на открытом воздухе

Рис. 1.25. Изменение  $f(v_d)$  в функции  $v_d$

дольных колебаний и скорость распространения ультразвукового импульса. С этой целью, чтобы уравнивать выражения, с помощью которых определяют значение модуля упругости по двум методам [см. соотношения (1.19) и (2.35)], задаются значением  $v_d$ . В результате преобразований получаем

$$f(v_d) = \frac{(1 + v_d)(1 - 2v_d)}{1 - v_d} = \left( \frac{2lf_{L_1}}{v_L} \right)^2, \quad (1.59)$$

где  $f_{L_1}$  — собственная частота продольных колебаний;  $v_L$  — скорость распространения импульса продольных ультразвуковых волн.

Значения функции  $f(v_d)$  для определения  $v_d$  можно найти по рис. 1.25.

Для исключения погрешностей в принятом отношении (1.59) необходимо, чтобы образец был достаточной длины ( $l \geq 4a$ ) и поперечные размеры были больше, чем длина волны ультразвука ( $a > 1,5\lambda$ ). Применяемая для испытания скорость распространения волн ультразвука должна измеряться по максимальной амплитуде принятого сигнала.

Этот метод определения динамического коэффициента Пуассона предусмотрен в английском стандарте BS 1881, однако он критикуется учеными из-за того, что в нем применяются совместно два метода, в которых частоты колебаний существенно различны. По-видимому, разница становится значительной в случае применения влажных или пористых материалов<sup>1</sup>.

Динамический коэффициент Пуассона изменяется в зависимости от возраста и влажности бетона. Влияние этих двух параметров показано на рис. 1.26. Динамический коэффициент Пуассона уменьшается с увеличением возраста бетона приблизительно от 0,5 для свежеприготовленного бетона до величины приблизительно  $v_d = 0,25$  для затвердевшего бетона в возрасте 14 суток [13]. Можно допустить, что после 14 суток нет существен-

<sup>1</sup> Подробно этот вопрос исследован О. Е. Сергеевым в Рижском политехническом институте. «Исследования по механике строительных материалов и конструкций», вып. 2. Рига, 1967 (примеч. науч. ред.).

ного изменения динамического коэффициента Пуассона. Для бетона, который сохраняется во влажной среде, коэффициент Пуассона более высокий, чем для бетона, находящегося в сухой среде. Эта разница имеет тенденцию к уменьшению с повышением возраста бетона.

Влияние динамического коэффициента Пуассона заполнителя на динамический коэффициент Пуассона бетона на основе данных, полученных авторами, показано на рис. 1.27. Здесь видно, что существует зависимость между предельными значениями величин динамического коэффициента Пуассона бетона (0,25—0,3) и заполнителя, применяемого для приготовления бетона (0,15—0,33). По-видимому, решающее влияние на величину

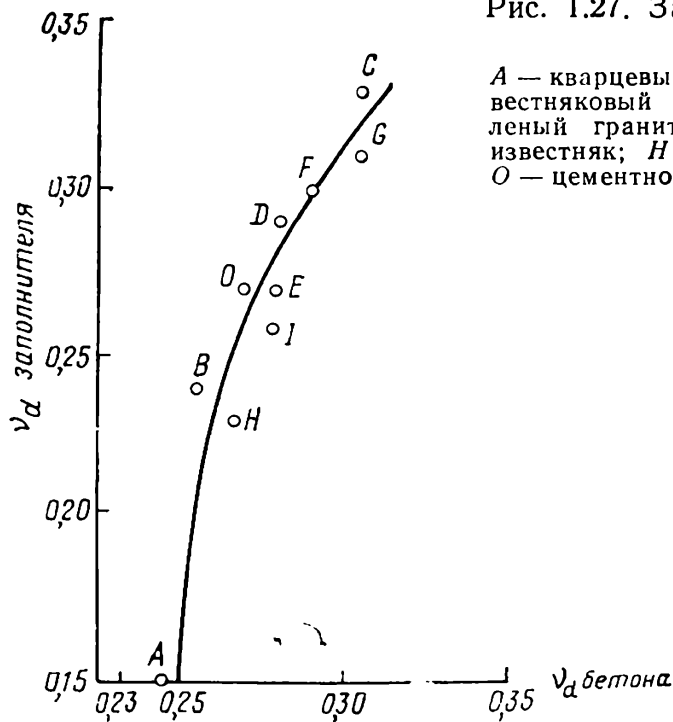


Рис. 1.27. Зависимость между коэффициентом Пуассона заполнителя и бетона

A — кварцевый гравий; B — щебень из кремния; C — известняковый гравий; D — дробленый базальт; E — дробленый гранит; F — дробленый трахит; G — дробленый известняк; H — дробленый сидерит; I — дробленый барит; O — цементно-песчаный раствор

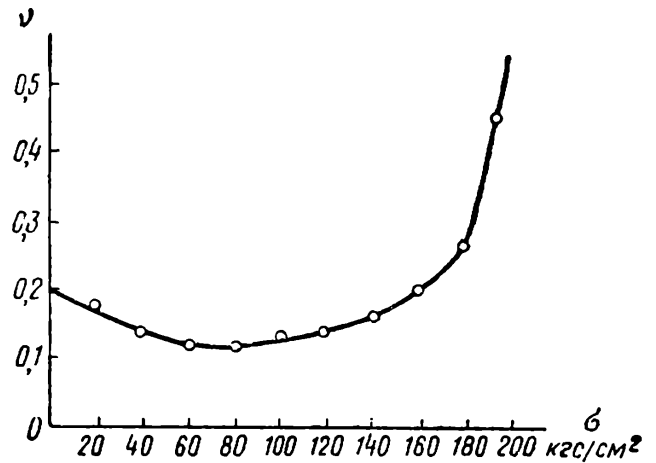


Рис. 1.28. Изменение коэффициента Пуассона в зависимости от напряжения

динамического коэффициента Пуассона нагруженного бетона оказывает эта часть бетонной смеси и главным образом поверхности раздела заполнитель—раствор, что характерно для всех бетонов.

Внесение в бетон полимерных добавок или пластификаторов сопровождается увеличением динамического коэффициента Пуассона, которое зависит от происхождения заполнителя и количества добавок. Например, добавка 20% полихлорпрена от всего количества цемента приводит к повышению коэффициента Пуассона с 0,23 до 0,28.

Связь между динамическим и статическим коэффициентом Пуассона является пока дискуссионным вопросом. Известно, что если под статическим коэффициентом Пуассона подразумевать отношение

$$\nu_{ст} = \frac{\epsilon_{tr}}{\epsilon_l}, \quad (1.60)$$

в котором  $\epsilon_{tr}$  — относительная поперечная деформация;  $\epsilon_l$  — относительная продольная деформация на уровне напряжений  $\sigma = (0,4, \dots, 0,5)R_{пр}$ , то

динамический коэффициент Пуассона будет приблизительно на 25% больше, чем статический. Разъяснений по поводу этой разницы не существует<sup>1</sup>. Новые исследования [13] показывают, что в области небольших напряжений и деформаций бетона и других материалов ( $\sigma < 0,15R_{pr}$ ) имеется возрастающая ветвь кривой изменения коэффициента Пуассона в функции напряжения (рис. 1.28). Эта ветвь позволяет сделать вывод о полном сходстве характера изменения статического и динамического коэффициентов Пуассона и модулей упругости. В обоих случаях можно ввести поправочные коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  между статическими и динамическими величинами:

$$v_{st} = \beta v_d; \quad E_{st} = \alpha E_d. \quad (1.61)$$

Эти коэффициенты равны единице, если напряжения, для которых определяются статические величины, очень небольшие. Если напряжения достигают предела  $(0,3, \dots, 0,6)R_{pr}$ , то статический коэффициент Пуассона может быть принят постоянным, а величина коэффициента  $\beta$  может быть в пределах 0,7—0,8. От напряжений по величине, больших, чем  $0,6R_{pr}$ , значения коэффициента  $\beta$  начинают снова увеличиваться, иногда быстро, так как материал находится вблизи зоны разрушения и коэффициент может достигнуть величины, равной почти 2. Значения коэффициента  $\beta$  для сжатого бетона в зависимости от уровня напряжения приведены ниже.

$\frac{\sigma_l}{R_{pr}}$	$\beta$
0	1
0,33	0,7—0,8
0,6	0,7—0,8
1	2

Значения  $\beta$  берут, принимая нагрузку, не выше  $\frac{\sigma}{R_{pr}} = 0,6^*$  либо, как и в случае определения модуля, по ориентировочным данным о свойствах материала.

### 1.7.5. Испытание бетона на морозостойкость

Применение резонансного метода для исследования свойств бетона при повторных циклах замораживания-оттаивания получило наибольшее распространение. Данные международной анкеты 1955 г. показали, что больше половины лабораторных исследований, относящихся к проблеме изуче-

<sup>1</sup> О. Е. Сергеев в статье, на которую мы уже ссылались (см. стр. 36), физически обоснованно объясняет это различие (примеч. науч. ред.).

\* Эта рекомендация слишком категорична. Нужно брать значения  $\beta$  при реальном соотношении  $\frac{\sigma_l}{R_{pr}}$  или при  $\frac{\sigma_l}{R_{pr}} = 0,33$ , что более соответствует требованиям норм, где  $\frac{\sigma_l}{R_{pr}} = 0,2$  (примеч. науч. ред.).

ния поведения бетона при замораживании-оттаивании, производились резонансным методом. В 1940—1955 гг. было опубликовано большое количество исследований на эту тему в США, Бельгии, Швеции, Франции и т. д.<sup>1</sup> Принципиальные выводы в отношении этих исследований в Румынии были сделаны позднее [14] и касались следующего.

1. На любой из резонансных методов с использованием продольных, изгибных и крутильных колебаний даны сопоставительные результаты исследований поведения бетона при замораживании-оттаивании. Однако существует мнение о преимуществе метода, основанного на использовании резонанса изгибных колебаний, по результатам которого можно быстро получить данные об изменении свойств поверхностных слоев бетона, в которых разрушительное действие замораживания-оттаивания проявляется быстрее всего.

2. Кроме использования методов, основанных на измерениях резонансных частот, не меньшее внимание было обращено на необходимость применения методов, основанных на определении коэффициента затухания, пользуясь зависимостью между коэффициентом качества по морозостойкости и логарифмическим декрементом колебаний.

3. Преобразование измеренной частоты резонанса в динамический модуль упругости следует дополнить сведениями о характере повреждений, возникающих при замораживании-оттаивании бетона, об образовании в бетоне трещин, расслаивании и т. д.

4. Качественная оценка долговечности бетона, подверженного циклам замораживания-оттаивания, может быть выполнена, по мнению автора [5], с помощью коэффициента  $m$ , характеризующего скорость разрушения и представленного выражением

$$m = \frac{100}{\eta} \left[ 1 - \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 \right], \quad (1.62)$$

где  $f$  — частота резонанса после  $\eta$  циклов замораживания-оттаивания;  $f_0$  — начальная резонансная частота.

В выражении (1.62) для  $\eta$  можно принимать любые условные величины, например 100, 200 или 300 циклов. Для бетонов с большими изменениями свойств принимают  $\eta = 100 \div 200$  циклов, если не ожидаются значительные изменения, берут  $m$  в зависимости от  $\eta$ .

В соответствии с описанной методикой классификация бетона по долговечности может быть представлена следующим образом:

$m < 0,02$	—	высокая морозостойкость бетона
$0,02 \leq m \leq 0,2$	—	средняя » »
$m > 0,2$	—	низкая » »

5. Для получения наиболее надежных результатов испытания нужно кроме собственных частот определять также и коэффициент затухания,

<sup>1</sup> Использование резонансного метода для определения морозостойкости бетона в СССР относится к 1956—1957 гг. В. А. Латишенко «Исследования по бетону и железобетону», вып. 2. Рига, 1957 (примеч. науч. ред.).



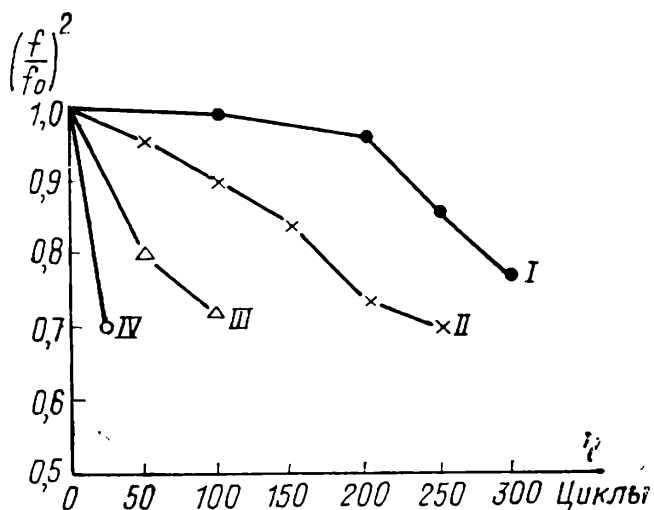


Рис. 1.29. Изменения резонансных частот в функции количества циклов замораживания-оттаивания бетона, приготовленного с различными отношениями  $V/C$   
 I —  $V/C=0,5$ ; II —  $V/C=0,6$ ; III —  $V/C=0,7$ ;  
 IV —  $V/C > 0,7$

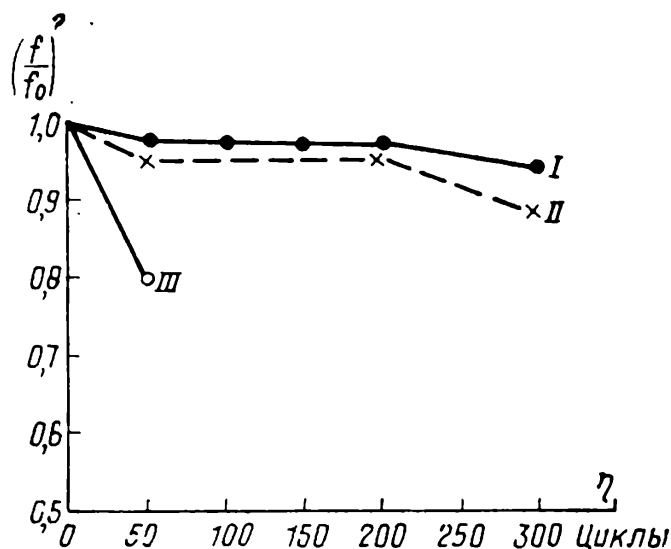


Рис. 1.30. Изменения резонансных частот в функции количества циклов замораживания-оттаивания бетона с различными добавками  
 I — винсол — 0,25%; II — ССБ — 0,2%; III — без добавок

По-видимому, для применения неразрушающего комбинированного метода в этой области имеются перспективы повышения точности.

6. Рекомендуется измерения, проведенные неразрушающим методом, дублировать контролем за потерей образцом массы, которая может служить дополнительным критерием оценки разрушения бетона.

7. Для установления типа резонанса в случае сильного повреждения образца воздействием замораживания-оттаивания необходимо использовать дополнительный преобразователь, предназначенный для исследования положения узловых точек.

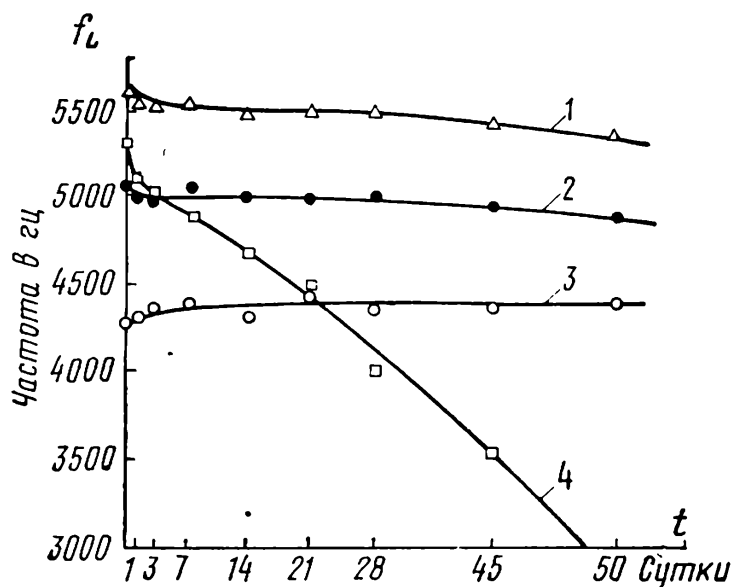
Для иллюстрации эффективности применения резонансного метода приведены графики на рис. 1.29 и 1.30, показывающие характер изменения резонансных частот изгибных колебаний в функции количества циклов замораживания-оттаивания для бетона, изготовленного с разными добавками пластификаторов [14]. Из графиков видно, что наиболее благоприятные результаты получены при снижении отношения  $V/C$  и с добавками пластификаторов, которые приводят, по существу, к снижению отношения  $V/C$ .

### 1.7.6. Испытание бетона на воздействие агрессивных сред

Резонансный метод для исследования поведения бетона в агрессивной среде, по имеющимся до 1955 г. данным, применялся редко. Исследования, проведенные в этот период, относились к изучению степени разрушения канализационных труб агрессивным действием сточных вод такими учеными, как Штудтерхейм, Лохнер и Бюргер. Испытывались составы бетона, отличающиеся только видом заполнителя. На основе полученных резонансным

Рис. 1.31. Изменения частоты собственных изгибных колебаний во времени для образцов бетонов с покрытиями из различных антикоррозионных составов, хранившихся в растворе 20%  $\text{HNO}_3$

1 — полимер  $\text{FA}$  + серная кислота; 2 — полимер  $\text{FA}$  + полимер эпоксидной смолы; 3 — полимер эпоксидной смолы; 4 — полимер  $\text{FA}$  + бензолсульфатная кислота



методом результатов был выбран наиболее рациональный состав бетона, который позволил увеличить срок эксплуатации канализации.

Резонансные методы были применены также в СССР В. В. Стольниковым и В. Б. Судаковым при изучении воздействия различных агрессивных агентов на бетон. В исследованиях, выполненных в INCERC, был принят резонансный метод изгибных колебаний для измерений собственных частот и затухания, а также метод продольных колебаний для оценки поведения бетона и раствора при агрессивном воздействии  $\text{CO}_2$ ; была оценена степень чувствительности цементов, исследована эффективность добавок латекса или специальных замазок для увеличения сопротивляемости агрессивному воздействию, исследована возможность применения защитных полимерных составов в промышленности органической химии. На рис. 1.31 приведены сопоставительные данные поведения различных антикоррозионных составов в растворах, содержащих 20%  $\text{HNO}_3$  [15, 16, 29]. Испытания показывают преимущество применения резонансного метода изгибных колебаний по сравнению с резонансным методом продольных колебаний, проявляемое в повышенной чувствительности к наблюдаемому коррозионному воздействию.

### 1.7.7. Исследование свойств бетона по затуханию колебаний

Широкое использование в последнее время измерений затухания колебаний в бетоне дает право вынести этот вопрос в специальный раздел.

Согласно разделу 1.5, существует два принципиальных метода измерения затухания: метод логарифмического декремента (амплитуды затухающих свободных колебаний) и метод ширины пика резонансной кривой.

Другие методы связаны с измерением размеров образца, чтобы исключить из окончательного результата внешнее трение, которое существует за счет контакта с образцом как возбудителя и звукоснимателя (очень жесткое соединение вызывает дополнительное трение), так и опор, на которых трение может погасить большую часть энергии колебаний.

Принимая во внимание этот факт, Джонс и Вельх [17] указали на два метода, дающие эквивалентные результаты, не зависящие от порядка гармоник колебаний, на которой проведены измерения (табл. 1.12).

Таблица 1.12. Влияние метода и порядка гармоник на измерения затухания

Качество бетона	Порядок гармоник	Q	
		метод логарифмического декремента	метод ширины полосы
Низкое (плохое)	1	54	48
	5	50	47
	11	48	—
Обыкновенное	1	110	139
	3	105	133
	5	102	108
	7	104	95
	9	100	123

Из приведенных в таблице результатов видно, что разница между двумя методами для различных порядков гармоник неравномерна, но в пределах современной точности измерений результаты эквивалентны. Однако по причинам экспериментального порядка рекомендуется для добротности  $Q < 50$  метод ширины резонансной кривой, а для добротности  $Q > 200$  — метод логарифмического декремента.

Исследуя изменения свойств бетона по затуханию, Джонс и Вельх [17] указали, что на основе результатов испытаний, приведенных на рис. 1.32, видно, что независимо от состава испытанного бетона добротность в зависимости от времени  $t$  можно принять в функции добротности  $Q_{28}$ , т. е. к 28 суткам, тогда уравнение примет вид

$$Q_t = Q_{28} \left( 1 + \frac{1}{2} \log \frac{t}{28} \right), \quad (1.63)$$

где  $t$  — время в сутках.

Что касается влияния структуры бетона на затухание, известны следующие данные. Повышение отношения  $V/C$ , которое приводит при приготовлении бетона к снижению плотности бетона, увеличивает затухание колебаний и снижает добротность.

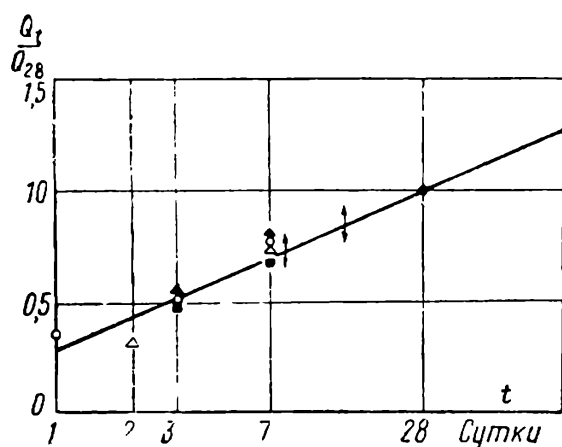


Рис. 1.32. Изменение добротности в функции времени [17]

Основное влияние зернового состава на затухание колебаний оказывают мелкие фракции заполнителя, поскольку большинство изменений относится к среде цементный раствор—заполнитель. Если увеличивать диаметр заполнителя до максимальных размеров, то тогда большое процентное содержание крупных фракций в заполнителе может привести к снижению затухания колебаний. Следует отметить, что имеется существенная разница между

измерениями затухания резонансным методом и измерениями затухания методом распространения ультразвукового импульса.

Если заполнитель дробленый, а не окатанный, как речной гравий, и с большей удельной поверхностью, то ожидаемое затухание колебаний в бетоне, приготовленном с таким заполнителем, будет бóльшим, чем в бетоне, приготовленном на речном гравии.

Присутствие в порах вместо воздуха воды приводит к увеличению затухания колебаний благодаря высокой вязкости воды в порах без воздуха. По этой причине при испытании образца, хранившегося в воде, особое внимание обращается на сохранение постоянной влажности образца во время испытаний. И в этом случае существует разница между результатами измерений затухания при резонансе и при использовании техники измерения затухания ультразвукового импульса.

### 1.7.8. Определение механической прочности бетона

Установление связи между резонансной частотой или динамическим модулем упругости и механической прочностью бетона потребовало на исследование много времени.

Первые опыты были проведены в США в 1940 г. Томсоном [18], Виллисом и Реусом [19] для установления изменения прочности на растяжение при изгибе ( $\Delta R_{ti}$ ) в зависимости от изменения модуля упругости ( $\Delta E_d$ ). Измерения проводились резонансным методом изгибных колебаний при испытании бетона на морозостойкость. Было предложено уравнение

$$\Delta R_{ti} = 6\Delta E_d^{0.6}, \quad (1.64)$$

где  $\Delta R_{ti}$  и  $\Delta E_d$  — соответственно изменение прочности в процентах и динамического модуля упругости, если величины были взяты в  $кгс/см^2$ .

Дальнейшие попытки [20] нахождения более общего соотношения между прочностью на изгиб и динамическим модулем упругости привели к выражению в общем виде:

$$R_{ti} = A + BE_d + CE_d^2, \quad (1.65)$$

в котором  $A$ ,  $B$  и  $C$  постоянные, зависящие от вида испытываемого бетона.

Шефдевилль [10] в 1953 г. предложил отношение между прочностью  $R_{ti}$  и модулем  $E_d$ , в котором учел и коэффициент Пуассона  $\nu_d$  бетона, в виде

$$R_{ti} = \frac{E_d^2 (1 - \nu_d)^2}{K_1^2}, \quad (1.66)$$

где  $K_1$  изменяется в интервале между 50 000—70 000 в зависимости от вида бетона;  $R_{ti}$  и  $E_d$  приняты в  $кгс/см^2$ .

Другая серия исследований была посвящена установлению соотношения между прочностью при сжатии  $R_c$  и динамическим модулем упругости. Впервые Лермит (1950) [21] воспользовался выражением

$$R_c = \frac{E_d^2}{K_2^2}, \quad (1.67)$$

где постоянная  $K_2$  изменялась в интервале 17 000—24 000 в зависимости от вида бетона;  $R_c$  и  $E_d$  приняты в  $кгс/см^2$ .

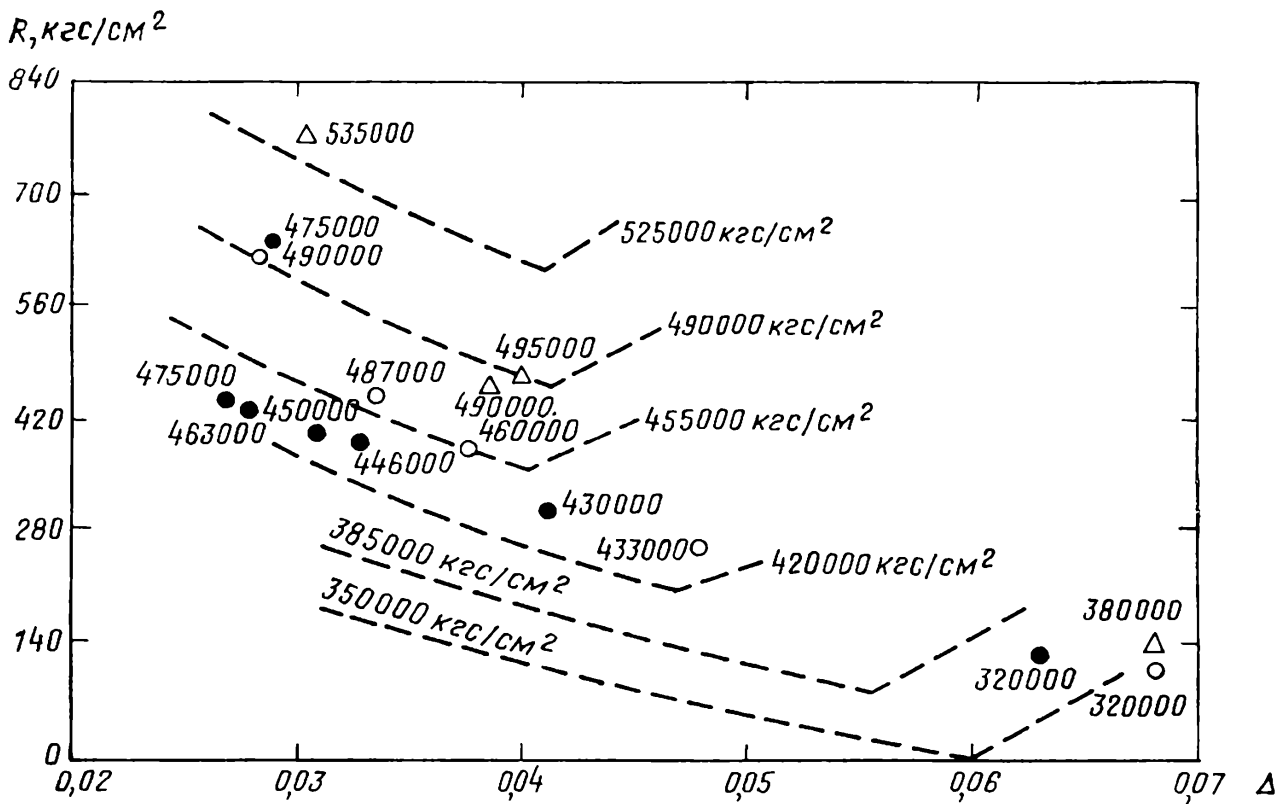


Рис. 1.33. Зависимость между прочностью при сжатии, логарифмическим декрементом колебаний и динамическим модулем упругости

Шефдевилль в 1953 г. предложил измененную форму отношения (1.67):

$$R_c = \left( \frac{E_d}{K_3} + 1,1 \right)^{4,3}, \quad (1.68)$$

в котором постоянная  $K_3$  имеет численное значение 134 000, не зависящее от бетона.

С сегодняшних позиций можно сказать, что нельзя ожидать получения единого однозначного соотношения между динамическим модулем упругости и прочностью, не зависящего от вида и количества применяемого цемента, вида и зернового состава заполнителя, возраста и влажности бетона. В целях повышения точности определения прочности ученые направляют свои усилия на использование комбинированных методов неразрушающих испытаний. Одним из проверенных комбинированных методов, предложенных Катарином [22], было совместное использование модуля упругости  $E_d$  и модуля сдвига  $G_d$ . Этот метод был применен к стандартному раствору и базировался на уравнении

$$E_d G_d = c \left( \frac{R_c}{R_c + b} \right)^2, \quad (1.69)$$

где постоянные  $b$  и  $c$  зависят от вида цемента;  $b$  — содержание трехкальциевого силиката в %; отношение  $c/b$  — удельная поверхность цемента.

Другое сочетание предложили Кеслер и Хигучи [23], которые использовали совместно динамический модуль упругости и логарифмический декремент колебаний. Для преобразования результатов в прочность они применили график, в котором по оси абсцисс наносили логарифмический декремент  $\Delta$ , а по оси ординат — прочность при сжатии  $R$ . На этом графике они

нанесли кривые равных значений динамического модуля упругости  $E$  (рис. 1.33). Из пары значений  $E_d$ ,  $\Delta$  определяется одно-единственное значение — прочность при сжатии  $R$ . Комбинированный метод, принятый Кеслером и Хигучи, представляет собой шаг вперед в сравнении с простым резонансным методом, основанным на использовании физических величин  $f$  или  $\Delta$  по отдельности.

Авторы, однако, преувеличивают универсальность метода, претендуя на то, что метод применим во всех случаях, независимо от вида испытываемого бетона. Исследования, выполненные Джонсом и Вельхом [17], показывают, что результаты зависят главным образом от вида применяемого заполнителя, а также и других факторов. Без сомнения, эти факторы менее многочисленны, чем в случае использования зависимостей  $R_c - E_d$  или  $R_c - \Delta$ .

### 1.7.9. Исследование работы бетона на знакопеременные нагрузки

Резонансная техника изгибных колебаний была разработана относительно недавно Гетфилдом [24] для нагружения переменными усилиями балок из неармированного бетона. Для испытания был использован возбудитель с катушкой и подвижным сердечником и двумя усилителями мощности с положительной и отрицательной поляризацией, обеспечивающий максимальные усилия около 7 кгс, необходимые для возбуждения резонанса балки.

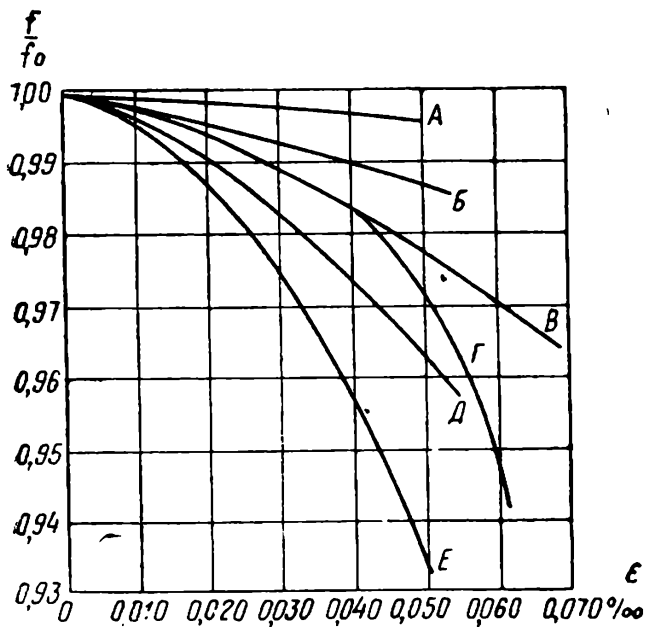


Рис. 1.34. Влияние величины переменного усилия на резонансную частоту бетонной балки

А — раствор; Б, В — песок и гравий Руджелся; Г — песок и гравий Кертсэя; Д — песок Кертсэя, известняк Дербшира; Е — песок Кертсэя, гранит Чернавода

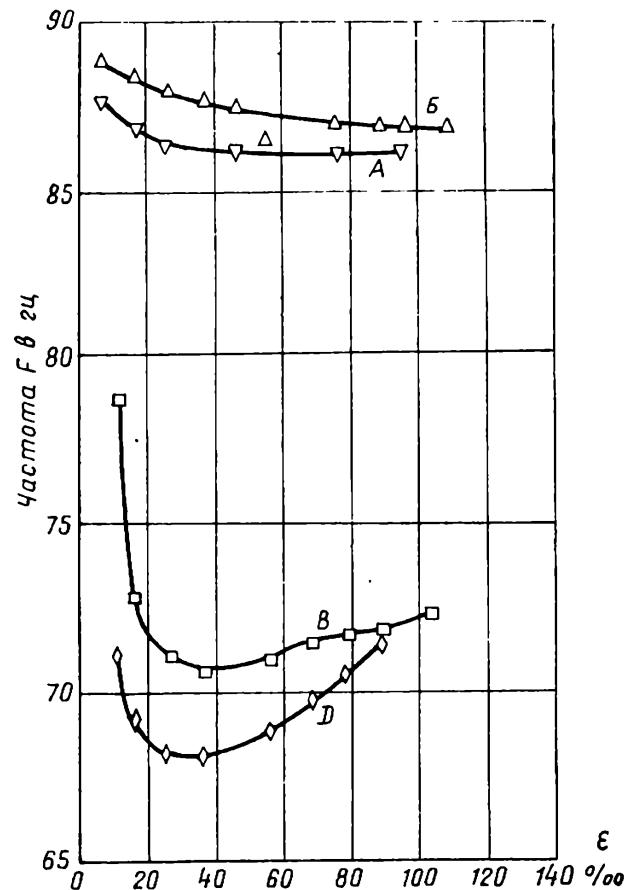


Рис. 1.35. Изменение резонансной частоты от разгрузки и возобновления испытания

А — разгрузка балки (бетонная смесь В); Б — возобновление испытания балки (бетонная смесь В); Д — разгрузка балки (бетонная смесь F); В — возобновление испытания балки (бетонная смесь F)

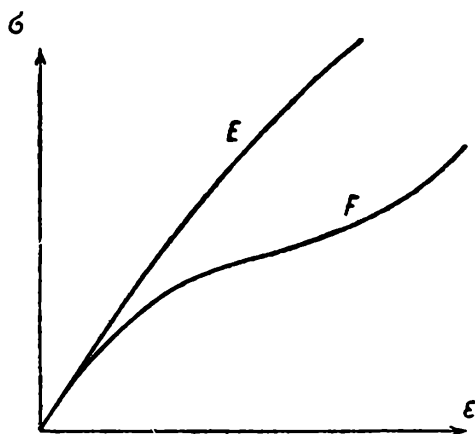


Рис. 1.36. Характеристическая кривая  $\sigma$ — $\epsilon$  — для балок типа В и F'

$E$  — кривая, построенная по кривой  $A$  (см. рис. 1.35);  $F$  — кривая, построенная по кривой  $B$  (см. рис. 1.35)

Благодаря коэффициенту усиления  $a \approx 100$  фактическое усилие было 700 кгс. Испытываемая балка имела размеры  $15 \times 7, 5 \times 180$  см; опоры были расположены на 0,224 от длины балки. Принятое усилие давало возможность создавать переменные деформации, значения которых измерялись с точностью до 0,12. Балку испытывали до разрушения.

Исследованиями было установлено влияние величины переменных усилий на резонансную частоту и результаты были приведены в виде графика на рис. 1.34. Из графика видно, что по мере увеличения усилия резонансная частота снижалась; следовательно, снижался как динамический, так и статический модуль упругости. Снижение величин модулей упругости, показанное на рис. 1.34, зависит от состава бетона и от вида заполнителя.

Другие интересные наблюдения Гетфилд провел при разгрузке балки, которая не была разрушена после 1 дня испытания. Разгружая постепенно балку типа Б от деформации, получаем кривую возврата резонансной частоты  $A$  (кривую  $A$ ) согласно рис. 1.35. В разгруженном состоянии балку оставляют в течение 2 дней для того, чтобы деформации остановились в начальной точке кривой  $B$ , затем после возобновления нагружения изменение резонансных частот идет по кривой  $B$ .

Такая же операция проводится и с балкой типа  $D$ , но с нагружением, близким к предельному, что приводит к разгрузочной кривой  $D$  (и  $F$  по рис. 1.36) и при новом нагружении к кривой  $B$ , ход которой отличается от хода кривых  $A$  и  $B$ , полученных при минимуме нагрузки. Из характеристических кривых для двух балок следует вывод, что соответственно кривым  $A$  и  $D$  строят кривые  $E$  и  $F$ , изображенные на рис. 1.36. В то время как кривая  $E$ , соответствующая балке типа Б, практически представляет собой прямую, кривая  $F$ , соответствующая балке С, далека от прямой линии, и это указывает на то, что эта балка была нагружена деформацией или переменным усилием, которое при достаточно большом количестве загрузений привело бы к разрушению балки от усталости.

### 1.7.10. Контроль качества забивных свай

Один из методов контроля забивных свай разработан Пакэ [25], который использовал для этой цели так называемый метод механического импеданса, являющийся, по существу, резонансным методом.

Метод основывается на измерении механического импеданса вершины сваи (по отношению к забивке) и представлении его изменения в функции

частоты. Известно, что под механическим импедансом подразумевают отношение комплексной амплитуды колебательной силы у верха сваи к скорости перемещения, которое зависит от величины и от частоты вынуждающей силы.

Общая схема аппаратуры, необходимой для проведения испытания, показана на рис. 1.37. Изменение механического импеданса вверху сваи в зависимости от частоты получено на двух опытных сваях с одинаковыми геометрическими размерами, но разных по качеству. Данные испытания показали четкую разницу между траекториями кривых для двух свай, на которых показаны разные дополнительные резонансы. Для получения необходимых результатов нужно, чтобы сваи не были очень длинные (до 15 м), тогда затухание не будет слишком большим. В противном случае механический импеданс стремится к волновому сопротивлению, одинаковому для всей сваи данного диаметра независимо от ее качества. Можно доказать, что размер, от которого зависит характеристический импеданс, представляет собой отношение  $\frac{l}{v_D}$  ( $l$  — длина сваи;  $v_D$  — скорость продольных волн, зависящая от типа и арматуры сваи) и, если существуют сомнения относительно величины  $l$ , оценка качества сваи не может быть достоверной. В этом случае можно получить одинаковые результаты в опытах с короткой сваем и низким качеством бетона и с длинной сваем, но из бетона хорошего качества. По этой причине метод является эффективным для свай одинаковой длины.

Характер крепления (заанкеривания) сваи может быть оценен путем сопоставления средних частот. Для свай, которые забиваются в неплотных болотистых грунтах, этот метод неприменим.

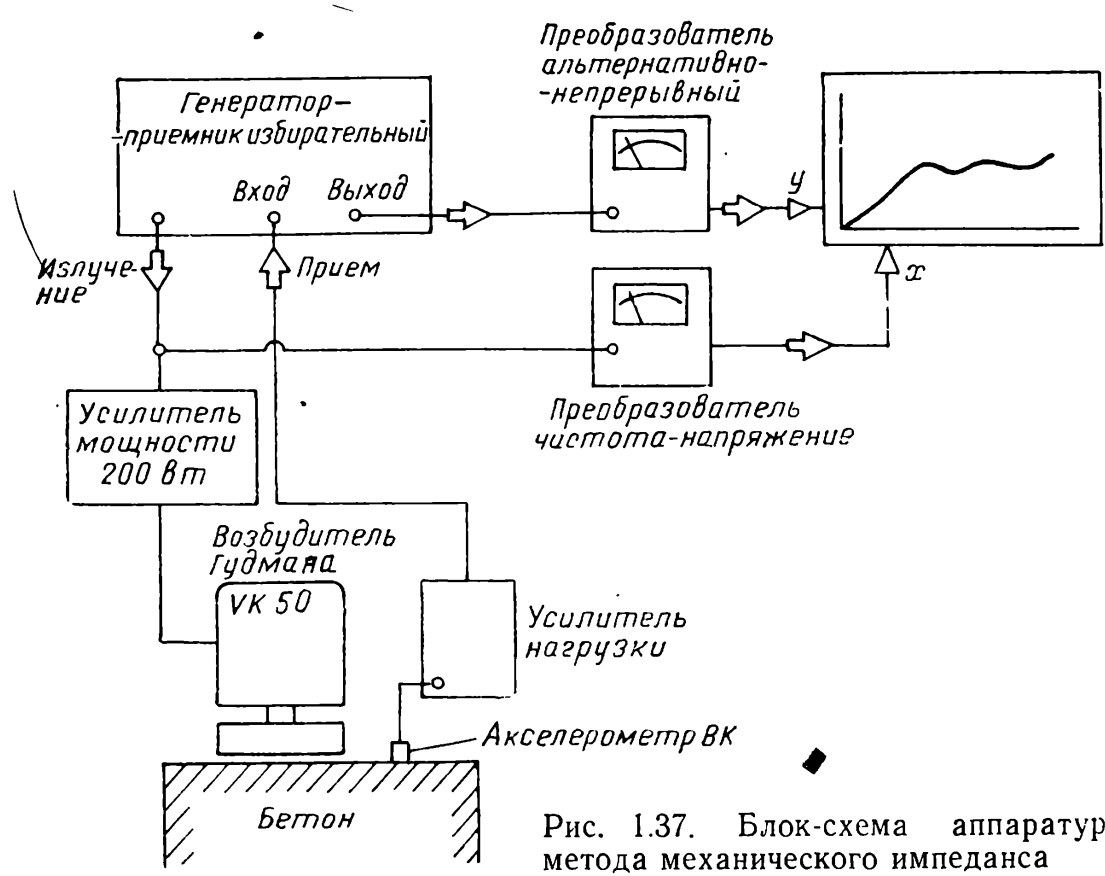


Рис. 1.37. Блок-схема аппаратуры метода механического импеданса



В итоге метод можно использовать как сравнительный при забивке железобетонных свай с постоянным поперечным сечением, достаточно большим диаметром ( $D \geq 60$  см) и длиной до 15 м, допуская обнаружение больших дефектов, но исключается возможность определить длину заанкеривания свай и среднюю скорость распространения волн.

### 1.7.11. Испытание балок из предварительно-напряженного железобетона изгибными колебаниями

Резонансный метод с успехом применялся Кочисом и его сотрудниками [26] при испытаниях изгибными колебаниями предварительно-напряженного железобетона<sup>1</sup>. Он установил, что как разрушающий момент, так и резонансная частота изгибных колебаний зависят от дополнительных факторов: качества бетона, инерционных характеристик поперечного сечения, пролета или длины балки (шпалы).

Принятая аппаратура состояла из электромагнитного излучателя, собственная частота которого была выше 200 гц, имеющего движущуюся массу 250 г и мощность 25 вт. Приемник был принят такого же типа, но облегченной модели с резонансной частотой 200 гц и минимальной чувствительностью 10 мв/г ( $g$  — ускорение силы тяжести).

В первую очередь необходимо было установить расстояние между опорами, так как поперечное сечение шпалы было переменным. Выбор точки приложения нагрузки, возможно, был подсказан положением рельсового башмака на шпале длиной 242,6 см, поэтому было принято расстояние от башмака, равное 104,6 см. Теперь становится очевидным, что следует принять два относительно близких резонанса между опорами и вне опор. В результате наложения двух резонансов расстояние между опорами оказалось равным 115 см, что соответствует значению равному 0,474  $l$ , вместо 0,552  $l$ , которое рекомендуется для элементов с постоянным моментом инерции (см. раздел 1.3).

В соответствии с заключением авторов имеется возможность резонансным методом определять несущую способность шпал с точностью  $\pm 7\%$  и результаты могут быть проверены классическими испытаниями — разрушением<sup>2</sup>. Очевидное преимущество этого метода позволяет более детально контролировать качество продукции; следовательно, увеличивается срок эксплуатации конструкций, а также исключается потребность в образцах для испытаний до разрушения.

<sup>1</sup> С 1960 г. в Тбилиси ведутся работы по использованию вибрационного метода при испытании железобетонных конструкций и сооружений. См. обзор руководителя этих работ д-ра техн. наук Э. А. Сехниашвили «Основные положения неразрушающего динамического метода оценки несущих свойств готовых предварительно-напряженных железобетонных конструкций серийного производства». Техническая информ. Строитво и арх., № 15, Госстрой ГрузССР, Тбилиси, 1969 (примеч. науч. ред.).

<sup>2</sup> С приведенными здесь соображениями нельзя согласиться. Как показали тщательно поставленные эксперименты Г. Б. Шмакова в Московском инженерно-строительном ин-те, на более простых, чем преднапряженные шпалы, элементах — надоконных железобетонных перемычках Б-200 — среднее квадратичное отклонение точек корреляционной зависимости «частота собственных колебаний — предельный изгибающий момент» от кривой регрессии составило 30,5% (примеч. науч. ред.).

### 1.7.12. Определение толщины бетонной плиты

Если в плите толщиной  $h$  возбуждены колебания, волны распространяются в продольном направлении. Первичный резонанс возникнет тогда, когда колебания двух поверхностей плиты совпадут с колебаниями возбуждателя. Условием для этого служит выражение

$$h = \frac{\lambda}{2} = \frac{v_L}{2f_L}. \quad (1.70)$$

Если под плитой находится другой материал, возможности применения метода зависят от разных акустических свойств (импеданса  $\rho_d v_L$ ) материала плиты и основания.

Наиболее благоприятные условия для испытания создают следующие материалы и конструктивные элементы: бетон обыкновенного качества на дорожном покрытии из гранулированных материалов или фундамент из более плотного бетона высокого качества на слабом основании. Между бетоном и основанием необходима прослойка, например слой битума.

Для системы из двух слоев (плита—основание) продольный резонанс определяется из условия (Джонс и Троуэр, 1965 [27])

$$v_{L_1} \rho_{d_1} \operatorname{tg} \frac{\omega h_1}{v_{L_1}} + v_{L_2} \rho_{d_2} \operatorname{tg} \frac{\omega h_2}{v_{L_2}} = 0, \quad (1.71)$$

где индексы 1 и 2 указывают порядок слоев, а  $\omega$  — угловая частота — определяет требуемую резонансную частоту. Муэноу в США [28] выполнил увенчавшиеся успехом эксперименты в области измерения толщин бетонных плит, используя пьезоэлектрический возбудитель большой мощности (5 вт), составленный из мозаики пьезокристаллов с собственной частотой 11 кГц. Для толщин, относительно небольших, частоты достаточно удвоить. Пьезоэлектрический приемник применялся с собственной частотой 60—80 кГц.

Для определения толщины плиты в соответствии с соотношением (1.70) необходимо также знать скорость продольных волн в плите. С этой целью Муэноу использовал аппаратуру, применяемую в импульсной технике при измерениях с одной поверхности (раздел 2.4.1). Несмотря на то, что такие измерители можно, в принципе, критиковать за необходимость согласования между значениями  $v_L$  на поверхности и внутри образца, по мнению авторов, они не могут дать большой ошибки, если расстояние преобразователь—приемник принимается достаточно большим (минимум 40 см), так как опасность снижения точности измерений для бетона становится больше в тонких слоях. Поэтому эта работа включает те измерения, которые проведены в массивной части образца на больших расстояниях между излучателем и приемником. Необходимо также избегать измерений в зоне с трещинами или в других дефектных местах на поверхности образца.

Муэноу считал, основываясь на сопоставлении результатов с образцами в виде кернов, что точность измерения толщины плиты находится в пределах  $\pm 5\%$  при единичных измерениях в одной точке и  $\pm 2—3\%$  при многократных измерениях.

### 1.7.13. Продольный резонанс образца в форме куба

Мартинчек [1] начал свои теоретические исследования с установления допустимого соотношения между собственными частотами короткой призмы квадратного сечения и динамическим модулем упругости. В случае частот продольных колебаний на первой гармонике для куба соотношения для определения  $E_d$  принимают вид

$$E_d = 4l^2 f_{L_1}^2 \rho_d (1 + \nu_d); \quad (1.72)$$

$$E_d = 4l^2 f_{L_2}^2 \rho_d (1 - 2\nu_d); \quad (1.73)$$

$$E_d = 4l^2 f_{L_3}^2 \rho_d (1 + \nu_d) (1 - 2\nu_d); \quad (1.74)$$

$$E_d = 4l^2 f_{L_4}^2 \rho_d \frac{(1 + \nu_d) (1 - 2\nu_d)}{1 - 3\nu_d}. \quad (1.75)$$

Частоты, указанные в этих соотношениях, определяются для затвердевшего бетона приблизительно по следующей пропорции: 1:1,58:1,41:0,71. Следует отметить, что имеется возможность быстро вычислить динамический коэффициент Пуассона с помощью выражений (1.72) и (1.74):

$$\nu_d = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{f_{L_1}}{f_{L_3}} \right)^2 \right]. \quad (1.76)$$

В выражении (1.76) применяют средние частоты, взятые из ряда измеренных резонансных частот кубического образца [30, 31].

## 2. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД

### 2.1. ОБЩИЕ ДАННЫЕ

Ультразвуковой импульсный метод широко применяется при неразрушающих испытаниях бетона благодаря следующим особенностям:

применяется для любых видов деталей или конструктивных элементов; может быть использован для любых толщин<sup>1</sup>;

применяется для испытания элементов при доступе с одной поверхности;

обеспечивает информацией о качестве бетона во время производства работ;

требует минимальную предварительную подготовку поверхности образцов для испытания;

измерения занимают незначительное время; результаты являются показательными для больших расстояний, проходимых ультразвуком;

стоимость аппаратуры и самих испытаний умеренная;

позволяет оценить границы дефектной зоны в конструктивных элементах.

Однако существуют и значительные трудности при использовании ультразвукового импульсного метода, зависящие от большого количества параметров: техника измерения, частота сигналов, геометрические размеры элемента, в определенных пределах армирование (выбор зон испытания в зависимости от расположения арматуры), направление посылки импульсов в зависимости от направления укладки материала в изделие и расположения арматуры, влажность и термообработка во время твердения бетона, температура во время испытания, учет предварительного нагружения бетона, состава бетона и т. п. [1—5].

Многообразие факторов влияет на результаты измерений при контроле качества бетона, и незнание этих факторов приводит к неправильной трактовке полученных данных, а следовательно, и к ошибочной оценке самого метода.

Учитывая это, ультразвуковой импульсный метод применим для решения следующих проблем: исследование процессов схватывания цемента, а также и других типов вяжущих; локализация зон с дефектами, возникающих при изготовлении; определение толщины слоя, разрушенного под влиянием физических причин (воздействие огня и замораживание) или химических причин (коррозия); определение динамических упругих постоянных бетона; оценка однородности качества бетона в процессе приготовления; определение механической прочности бетона; изучение коррозии и ее воздействия на бетон, за исключением сульфатной коррозии; оценка эффективности различных методов, используемых при исследованиях бетона.

---

<sup>1</sup> Современная ультразвуковая аппаратура позволяет прозвучивать конструкции длиной не более 15 м (примеч. науч. ред.).

## 2.2. ПРИНЦИП МЕТОДА

### 2.2.1. Распространение ультразвукового импульса в бетоне

Ультразвуковой импульсный метод основывается на создании относительно короткого механического колебания, называемого импульсом. Частота колебаний должна быть высокой для того, чтобы фронт волны был достаточно крутой и допускал точное измерение, и в то же время достаточно низкой, чтобы импульс мог распространяться в бетоне на большое расстояние.

Применение чрезмерного увеличения ультразвуковой частоты может привести к появлению явления затухания в результате диффузионного отражения, которое появляется при длине волны, сравнимой с размером заполнителя  $\Phi$ :

$$\lambda = \frac{v}{f} \approx \Phi. \quad (2.1)$$

Для бетона с заполнителем диаметром до 30 мм соотношение (2.1) справедливо при частотах порядка 150 кГц.

Эти соображения определяют область ультразвуковых частот, применяемых для испытания бетона в пределах между 20 и 200 кГц. В интервале указанных пределов наиболее благоприятными для применения частотами являются частоты от 40 до 100 кГц.

Импульс передается бетону посредством механического контакта, для осуществления которого применяется связующая среда. Это требование надежного контакта вызывается необходимостью обеспечения наиболее полной передачи бетону энергии от генератора колебаний.

Импульс определенной частоты, проходя через бетон, распространяется во всех направлениях, передавая большую часть энергии бетону с помощью продольных волн в направлении, перпендикулярном к плоскости возбуждения. По этой причине становится возможным разместить приемник колебаний по продольной оси, перпендикулярной к плоскости возбудителя, на поверхности, параллельной по отношению к этому возбудителю (рис. 2.1).

После прохождения через бетон импульс ультразвуковых колебаний достигает приемника. Он является уже преобразованным по спектральному составу по отношению к своему первоначальному виду благодаря фильтрации частоты импульса самим бетоном.

Возникает проблема передачи механической энергии от бетона к приемнику, так как требуется создать аналогичные условия, при которых осуществляется передача импульса от возбудителя к бетону и преобразование в механические колебания.

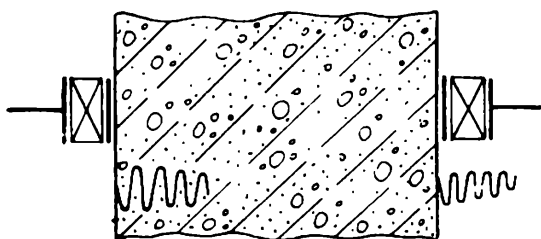


Рис. 2.1. Принцип ультразвуковых измерений в бетоне

Измерения нельзя проводить на основе наблюдения распространения одного импульса длительностью в десятые или сотые доли микросекунды. Поэтому необходимо посылать повторные импульсы с достаточно высокой частотой повторения для того, чтобы создать постоянное изображение на экране электронно-лучевой трубки. С другой стороны, частота повторения должна быть не слишком большой для того, чтобы существовал отрезок времени для полного затухания предыдущего импульса. В этих условиях частота посылки импульсов изменяется в пределах 1—50 в секунду.

Существующая в настоящее время методика ультразвуковых измерений основывается на использовании времени распространения ультразвука, а также на затухании импульса в бетоне.

### 2.2.2. Процесс генерации импульса

Импульс можно генерировать следующим образом: а) с помощью взрыва; б) с помощью удара, производимого молотком; в) с помощью электроакустического преобразователя [6].

Взрыв и удар молотком вызывают импульс несравнимо более сильный, чем электроакустический преобразователь. Однако импульсы, полученные таким образом, имеют широкий спектр частот и передний фронт волны будет очень небольшой крутизны, что делает невозможным измерения на небольшом расстоянии (меньше 30 см). Кроме того, удар, и главным образом взрыв, приводят к разрушению структуры бетона. По этой причине взрывной метод при испытаниях бетона не применяется.

Если импульс возбуждает устойчивые по энергии колебания от поверхности в полубесконечной среде, то возникают колебания трех видов. Самую высокую скорость распространения имеют колебания, в которых происходит движение частиц материала только в продольном направлении, в направлении распространения волн. Эти волны называются продольными или волнами сжатия. Связь между скоростью их распространения  $v_L$  и постоянными упругости среды приведена в разделе 2.5.5.

Затем по порядку скоростей следуют поперечные волны, именуемые в сейсмологии волнами  $S$ , которые, как и продольные волны, распространяются по всему твердому телу, но с меньшей скоростью —  $v_T$ . В случае поперечных волн частицы материала смещаются в направлении, перпендикулярном распространению волны.

Существует еще третий вид волн, который распространяется по твердой поверхности. Такие волны называются поверхностными, или релеевскими волнами, скорость их  $v_S$  составляет 0,91—0,93 от скорости поперечных волн при значениях коэффициента Пуассона материала 0,2—0,3.

При испытаниях, в которых предусматриваются небольшие расстояния от излучателя до приемника, наиболее благоприятные результаты дает применение электроакустических преобразователей. Хотя производимая ими энергия невелика по сравнению с ударом, они обладают преимуществом в генерировании колебаний с определенной преобладающей частотой, которая может обеспечить величину импульса такой, чтобы получить достаточно крутой фронт. Такое преимущество также может быть обеспечено большей направленностью излучаемой энергии благодаря использованию высокой

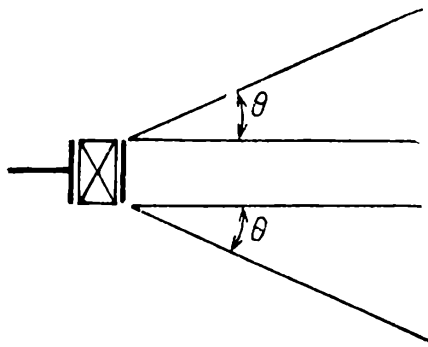


Рис. 2.2. Расходящийся пучок ультразвука

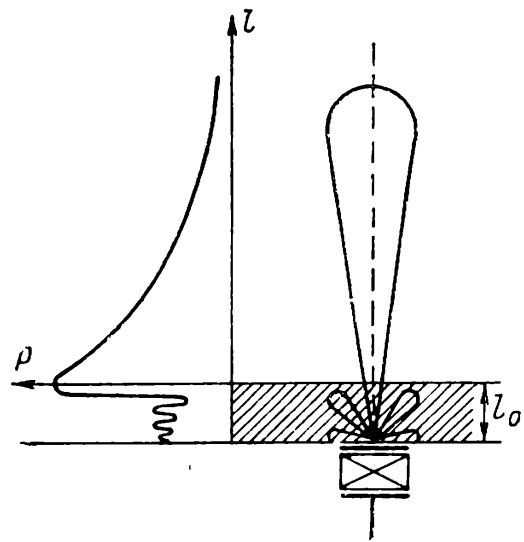


Рис. 2.3. Собственное поле излучателя и поле, удаленное от него

частоты, а также излучателя большого диаметра и лучшей концентрации энергии.

Для используемых длин волн основная энергия при распространении импульса в неограниченном пространстве распределяется в конусе с углом расхождения (рис. 2.2), который оценивается приближительным уравнением:

$$\sin \theta \approx \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (2.2)$$

где  $\lambda$  — длина волны;  $D$  — диаметр излучателя.

Имеется предел, от которого акустическое давление ультразвука снижается непрерывно, обратно пропорционально квадрату расстояния.

Этот предел  $l_0$  определяется приближительным уравнением:

$$l_0 \approx \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2.3)$$

и для области частот, применяемой для испытания бетона, составляет величину порядка 1 см (рис. 2.3).

При испытаниях бетона  $\theta$  практически всегда равно  $90^\circ$ . Из изложенного следует, что при испытаниях бетонных образцов, когда преобразователи устанавливаются на коротком расстоянии (меньше 1 м), предпочтительно использовать электроакустический преобразователь, а при испытаниях, когда расстояние больше 1 м, предпочитается возбудитель ударного типа, аналогичный молотку.

### 2.2.3. Влияние неоднородности, вязкоупругости, анизотропии бетона и геометрической формы образцов на распространение импульса

Применение ультразвукового импульсного метода при испытаниях бетона основывается на наблюдениях и измерениях времени распространения продольных волн (другие типы волн пока используют редко) и амплитуд принимаемого сигнала (редко прибегают к попытке измерения частот принимаемого импульса).

Оценка влияния неоднородности бетона осуществляется также по амплитудам получаемых сигналов и времени их распространения. Для облегчения изучения бетона последний разделяют на две основные компоненты: одна компонента является инертной, состоящей из заполнителя; другая — активная, включает раствор с порами или пустотами, наполненными воздухом или водой. Если допустить, что заполнитель характеризуется скоростью  $v_a$  распространения импульса, независимой от размеров гранул (что является приемлемым приближением), и что раствор с порами характеризуется скоростью  $v_m$ , тогда, складывая обе компоненты в один суммарный объем бетона, можем написать (рис. 2.4):

$$\frac{1}{v_b} = \frac{V_a}{v_a} + \frac{1-V_a}{v_m}, \quad (2.4)$$

где  $V_a$  — относительный объем заполнителя;  $v_b$  — скорость распространения, измеренная в бетоне.

Если выразим это отношение в функции  $v_m$ , получим

$$v_m = \frac{1 - V_a}{\frac{1}{v_b} - \frac{V_a}{v_a}}. \quad (2.5)$$

Выражение (2.5) показывает, что скорость  $v_m$  для данного значения  $v_b$  тем больше, чем объем заполнителя  $v_a$  больше и скорость в заполнителе  $v_a$  меньше. Следовательно, скорость распространения ультразвука в бетоне зависит от вида и прочности раствора и от объема и вида заполнителя.

Неоднородность состава бетона может отражаться и на результатах измерений скорости на коротком расстоянии (меньше чем в 3—4 раза превышающем максимальный диаметр заполнителя). Эти скорости сильно изменяются от точки к точке в зависимости от состава бетона в направлении распространения импульса. Явление неоднородности бетона в зависимости от размеров базы (расстояние от излучателя до приемника) исчезает с ее длиной, равной приблизительно 10-кратному максимальному диаметру заполнителя.

Влияние вязкоупругости материала на распространение импульса было изучено Кольским [7]. Он показал, что импульс распространяется теоретически с такой же скоростью, как и в упругих материалах, но благодаря рассеянию и затуханию изменяется его форма. При этом происходит сглаживание переднего фронта волны и точность определения момента прихода импульса снижается. Влияние вязкоупругости в зависимости от применяемой техники измерения (см. раздел 2.4) может быть не менее сильным, чем влияние неоднородности.

Влияние анизотропности бетона хорошо заметно вблизи поверхности уложенного бетона. В этой зоне вследствие использования механических средств уплотнения выделяется слой, отличающийся от остального бетона большим

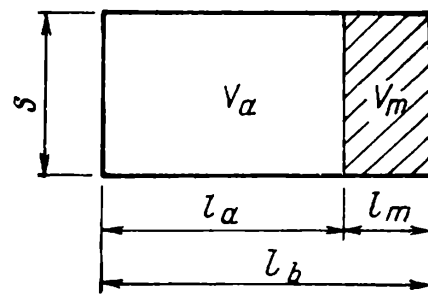


Рис. 2.4. Упрощенная схема бетона



содержанием цемента, воды и мелкой фракции заполнителя. Таким образом, увеличиваются анизотропные свойства бетона вдоль укладки бетона. Проводимые измерения распространения импульса крайне чувствительны к этим изменениям в поверхностном слое или вблизи его и полученные в этой зоне характеристики нельзя распространять на всю массу элемента.

В заключение следует отметить, что бетон как любой твердый упругий материал вызывает геометрическую дисперсию ультразвукового импульса. Это явление заключается в изменении формы волны, распространяющейся в материале, и наблюдается тогда, когда поперечные размеры опытного образца близки к длине волны, вырабатываемой излучателем. Продольные волны, которые теоретически распространяются в твердом бесконечном массиве, начинают постепенно преобразовываться в упругие волны растяжения в стержне. В этом случае скорость их распространения снижается, что описано в разделе 2.5.1.

### 2.3. АППАРАТУРА, ПРИМЕНЯЕМАЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ИМПУЛЬСНОМ МЕТОДЕ

#### 2.3.1. Прибор для испытания методом удара с двумя приемниками

Один из первых методов, примененных для измерения скорости распространения механических колебаний в бетоне, заключался в создании упругих волн с помощью удара молотком (рис. 2.5). Импульс воспринимался последовательно двумя приемниками 1 и 2, расположенными на определенном расстоянии друг от друга [1].

Механический импульс, воспринятый первым звукоприемником и преобразованный им в электрический, усиливался и возбуждал тиратрон, который подает зарядный ток на конденсатор. Спустя некоторое время механический импульс, достигший второго звукоприемника, также преобразовывался в электрический сигнал, который затем усиливался и подавался на второй тиратрон, прекращающий поступление зарядного тока. Напряжение,

накопленное между пластинами конденсатора, измеряется ламповым вольтметром, и его величина является функцией времени накопления заряда в конденсаторе, а также других постоянных параметров зарядной цепи.

Прибор может быть отградуирован с помощью электрических импульсов с заданными интервалами времени.

В качестве звукоприемников наилучшие результаты получились с адаптерами для грамзаписи, особенно строго согласованными характеристиками.

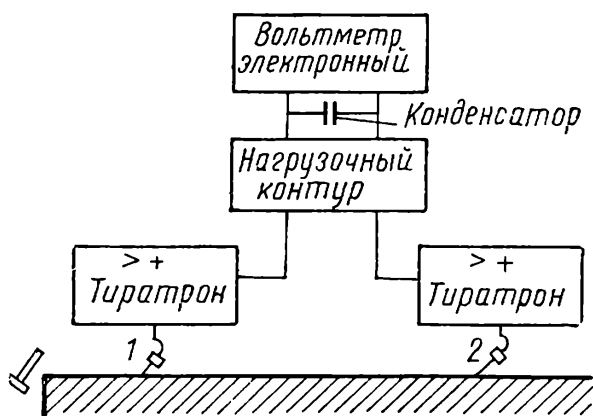


Рис. 2.5. Общая схема аппаратуры, применяемой для ударного метода с одним приемником

Прибор может применяться для испытаний при относительно больших расстояниях между приемниками, так как при небольших расстояниях измерения недостаточно точны.

### 2.3.2. Приборы для ударного метода с одним приемником

Прибор SBC-40, применяемый во Франции [8, 9], показан на рис. 2.6. Схема другого прибора SBC-4 с электромеханическим излучателем показана на рис. 2.7. Металлическая наковальня, по которой бьет боек механического молоточка, осуществляет контакт с бетоном примерно 5 раз в секунду. Колебание, возникшее от удара бойка по наковальне, передается в бетон, а затем воспринимается магнитострикционным приемником. На наковальне молоточка имеется также маленький приемник колебаний, преобразующий механический импульс в электрический, который служит для возбуждения электронных узлов схемы (рис. 2.8, а). Импульсы этого маленького приемника подаются на вход ждущего генератора, содержащего также усилитель и контур формирования импульса. Форма сигнала на выходе ждущего генератора зависит от генератора развертки электронно-лучевой трубки, формирующего импульсы, показанные на рис. 2.8, б; они также запускают строб-генератор. В схеме аппаратуры имеются контуры, которые содержат

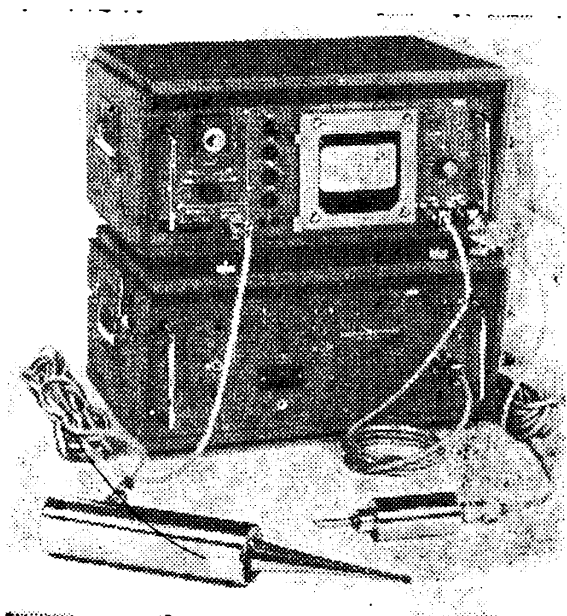


Рис. 2.6. Общий вид прибора SBC-40

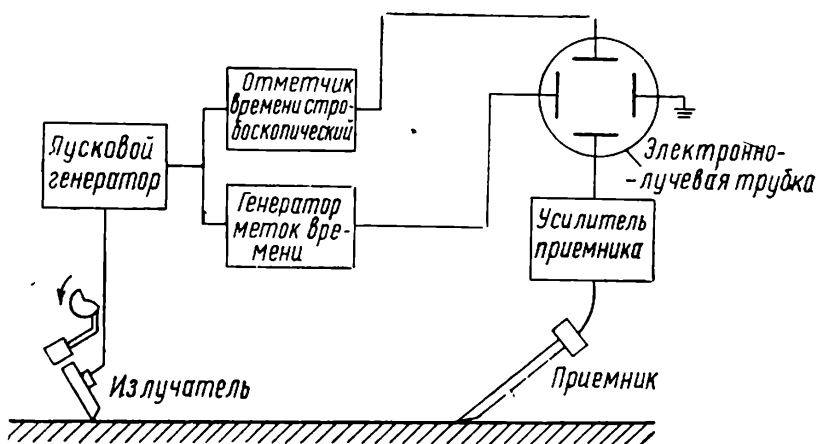


Рис. 2.7. Общая схема динамического звукоизмерителя SBC-4

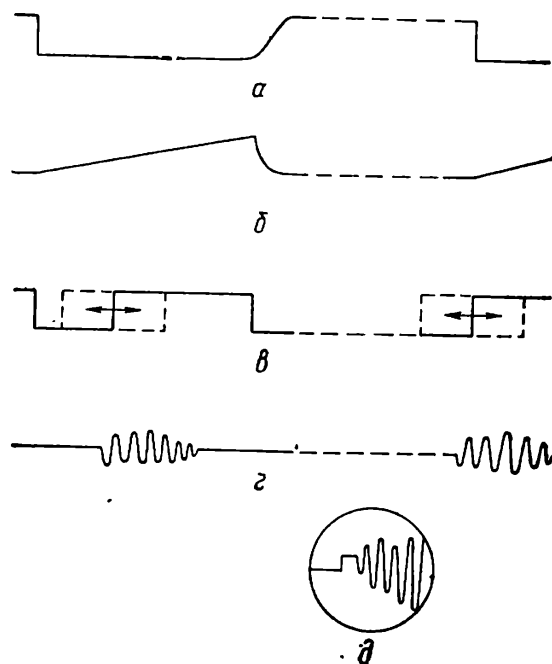


Рис. 2.8. Форма импульса на приборе ударного типа с одним приемником

переменную задержку времени, позволяющую изменить положение строб-импульса по времени относительно начала развертки с помощью регулирующего потенциометра (рис. 2.8, в). Шкала строб-контроля градуирована в микросекундах и позволяет уточнить положение репера по времени.

Сигнал от магнитострикционного звукоприемника после усиления (рис. 2.8, г) поступает на вертикально отклоняющую пластину электронно-лучевой трубки вместе со строб-импульсом (рис. 2.8, д). Время распространения импульса определяется при совпадении строб-сигнала со вступлением переднего фронта волны; это совпадение достигается при помощи стробоскопического потенциометра.

### 2.3.3. Ультразвуковой импульсный прибор

Общая схема ультразвукового импульсного прибора включает следующие элементы (рис. 2.9): ведущий генератор, который генерирует отрицательный прямоугольный импульс (рис. 2.10, а) с частотой повторения, обычно равной 50 гц. Эти импульсы обеспечивают одновременный запуск излучателя генератора развертки и генератора меток времени непосредственно или с помощью задержки.

Задержку пуска зондирующих импульсов от излучателя создает прямоугольный импульс, длительность которого регулируется в пределах 10 мкс и задним фронтом которого запускается генератор зондирующих импульсов (рис. 2.10, б). Импульс, поданный на излучатель (рис. 2.10, в), имеет амплитуду около 1000 в в зависимости от использованного пьезоэлектрического элемента. Это ударное напряжение возбуждает пьезоэлектрический кристалл, излучающий ультразвуковые колебания, с частотой, равной резонансной частоте кристалла.

После распространения через бетон ультразвуковой импульс принимается преобразователем, трансформируется в электрический сигнал и затем подается на широкополосный усилитель (см. рис. 2.9). После выхода из этого усилителя сигнал подается на пластины *y* в электронно-лучевой трубке. К этим пластинам передается также небольшая часть зондирующего импульса от излучателя (рис. 2.10, в), который создает на экране начальный

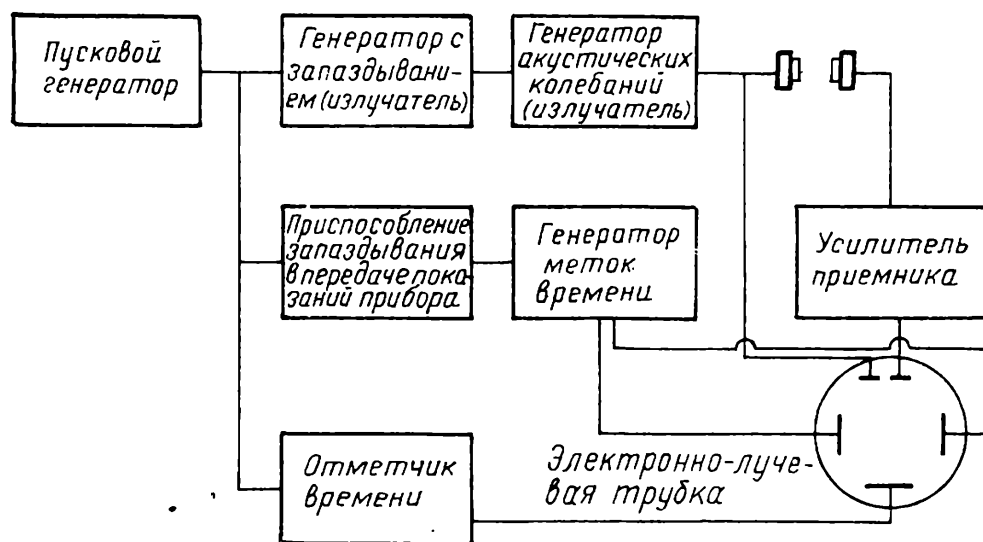


Рис. 2.9. Общая схема прибора с электроакустическими преобразователями

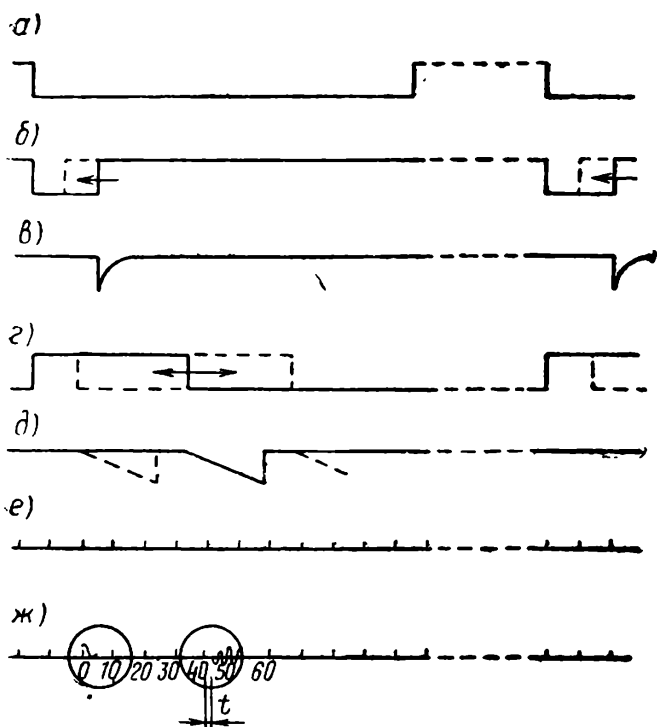


Рис. 2.10. Форма импульсов на приборе с электроакустическими преобразователями

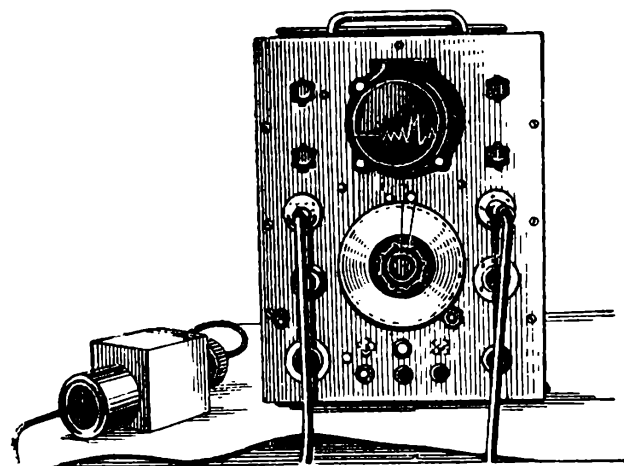


Рис. 2.11. Динамический звукоизмеритель SBR-2

импульс в виде прямоугольного треугольника (рис. 2.10, д) и дает возможность определять начало отсчета времени. Метки времени имеют длительность, равную 10 мкс (рис. 2.10, е), возбуждаются генератором меток времени с частотой 100 кГц (см. рис. 2.9), запускаемым от заднего фронта этого импульса или от прямоугольного импульса ведущего генератора (рис. 2.10, а). Для градуировки шкалы используют встроенный кварцевый генератор с кристаллом на 100 кГц. Момент начала работы генератора развертки (рис. 2.10, д) может регулироваться с помощью дополнительного блока задержки развертки (см. рис. 2.9), в задачу которого входит перемещение метки времени, соответствующей начальному импульсу относительно принятого импульса (рис. 2.10, г); благодаря этому можно подсчитать число проходящих меток времени между двумя импульсами. Промежуток времени  $t$  представляет собой отсчет по меткам времени 10 мкс, который может быть измерен с помощью задержки (см. рис. 2.9), позволяющей перемещать принятый импульс относительно меток времени (рис. 2.10, г).

В качестве примера используемой аппаратуры, которая работает по этому принципу, можно привести: ультразвуковой дефектоскоп Sawkell, изготовленный по указаниям Джонса и Гэтфилда в Англии, и динамический звукоизмеритель SBR-2 (рис. 2.11), изготовленный в лаборатории электроакустики во Франции по указаниям Дауэнса [1, 9, 10]\*.

\* В Советском Союзе с 1964 г. серийно изготавливаются приборы, аналогичные названным: УКБ-1М, ДУК-20, «Бетон-3М» (переносной прибор на транзисторах). Готовится к выпуску серийный прибор с цифровым отсчетом времени распространения упругого импульса (з-д «Электроточприбор», Кишинев) (примеч. науч. ред.).

## 2.4. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.4.1. Методика размещения преобразователей

Существует два возможных варианта размещения преобразователей при испытаниях бетона:

- размещение преобразователей по одной поверхности (рис. 2.12, а);
- размещение преобразователей на взаимно противоположных друг другу поверхностях, что называется методом сквозного прозвучивания (рис. 2.12, б).

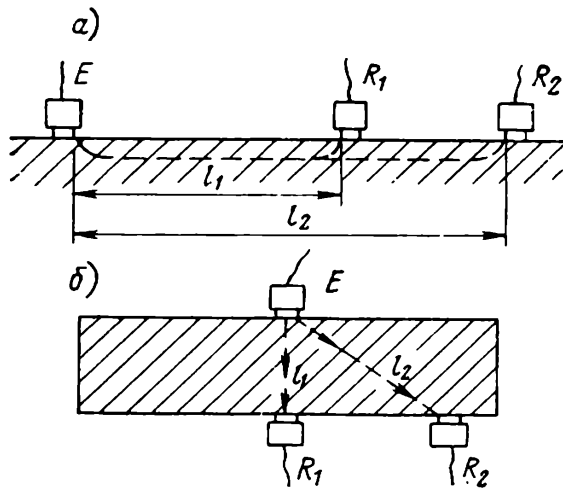


Рис. 2.12. Схема размещения пьезопреобразователей

а — по одной стороне; б — по разным сторонам

принимая различными расстояния между излучателем и приемником (см. рис. 2.12, а).

Исключая специальные случаи, следует избегать размещения преобразователей со стороны укладки бетона или же вблизи угла элемента. К специальным случаям относятся:

плиты с одной доступной поверхностью, когда она является стороной, с которой укладывали бетон;

случай, когда необходим слой бетона именно хорошего качества со стороны укладки.

Большой частью точки для испытания размещают как минимум в 8—12 см от грани элемента [11].

Если испытывают образцы и хотят измерить скорость распространения продольных волн, то как поперечные размеры образца, так и расстояние между преобразователями не должны быть меньше  $2\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны).

### 2.4.2. Выбор преобразователей

Иногда имеется возможность выбрать преобразователь, используя опыт прежних испытаний. Критерии, на основании которых производят такой выбор для бетона, следующие:

собственная частота должна находиться в пределах между 30 и 200 кГц; при испытаниях с помощью метода поверхностного прозвучивания пред-

Как правило, рекомендуется применять схему по п. «б».

Метод размещения преобразователей по одной поверхности рекомендуется применять для элементов с одной доступной поверхностью и при определении поверхностных дефектов в бетоне.

Сведения, которые получают методом поверхностного прозвучивания, определяют свойства слоя бетона толщиной 3—5 см от исследуемой поверхности. Сквозное прозвучивание определяет свойства всей толщины исследуемого бетона.

Энергия, распространяющаяся вдоль поверхности, незначительна, поэтому для повышения точности измерений рекомендуется производить больше отсчетов, при-

почитаются преобразователи, соприкасающиеся с поверхностью в точке, которые можно ориентировать по направлению, благоприятному для распространения продольной волны, т. е. вдоль поверхности;

при испытаниях с короткими расстояниями между излучателем и приемником (меньше 30 см) преимущественно используются преобразователи с собственной частотой больше 100 кгц;

при испытаниях со средними расстояниями (30—120 см) применяются преобразователи с собственной частотой между 45 и 100 кгц;

при испытаниях с большими расстояниями (больше 120 см) применяются электромеханические излучатели.

### 2.4.3. Выбор мест испытания

При выборе мест испытания следует руководствоваться указаниями, приведенными в разделе 2.4.1.

В зависимости от вида конструкции рекомендуется следующее размещение мест (точек) испытания:

**к о л о н н ы** с двумя или со всеми доступными сторонами в наибольшем поперечном сечении, но не меньше, чем в трех местах: первое — у основания, второе — в середине, третье — в верхней части колонны. В каждом сечении выбирают точки по двум направлениям. Минимальное количество точек испытания по одной стороне колонны 2—3 в зависимости от поперечных размеров колонны. Расстояние точек испытания от грани колонны рекомендуется принимать в соответствии с разделом 2.4.1;

**б а л к и** на двух опорах с небольшой величиной  $\frac{h}{l}$  (высота/пролет) и большой шириной в середине балки: испытания в 2—3 сечениях, в зоне максимального момента и минимум в 2—3 точках, в сечениях по всей сжатой зоне;

**б а л к и** на двух опорах с большим соотношением  $\frac{h}{l}$  и небольшой шириной в середине балки: испытания, как и в предыдущем случае, в зоне максимального момента и дополнительно в зоне максимальных скалывающих напряжений, в двух поперечных сечениях на каждой стороне балки. Точки испытания следует располагать по всей ширине балки;

**н е р а з р е з н ы е б а л к и** или **р и г е л и р а м** в трех зонах: на каждой опоре и 2—3 сечениях в каждом пролете. В поперечных сечениях минимальное количество точек — 2—3;

**б а л к и** с последующим напряжением арматуры: на торцах перед передачей натяжения; стенка по всему пролету, полка только в середине, в зоне максимального момента;

**б а л к и** предварительно-напряженные или с последующим напряжением: полка — в середине пролета в зоне максимального момента; если сечение в середине пролета тоньше, то в этом месте также рекомендуется проверка, особенно там, где примыкает полка;

**б а л к и** предварительно-напряженные или с последующим напряжением, неразрезные: в зоне максимального момента в пролете и на опорах;

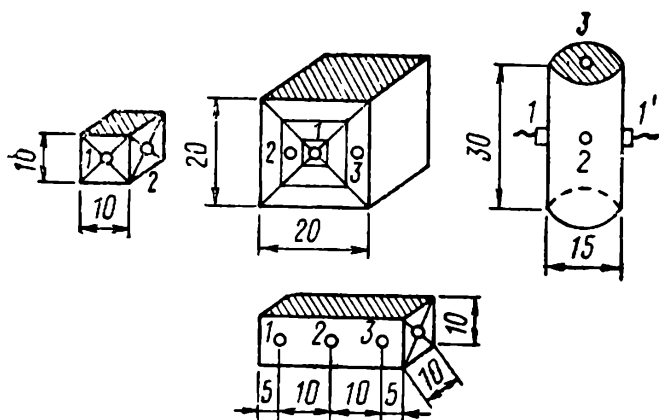


Рис. 2.13. Выбор точек испытания на образцах

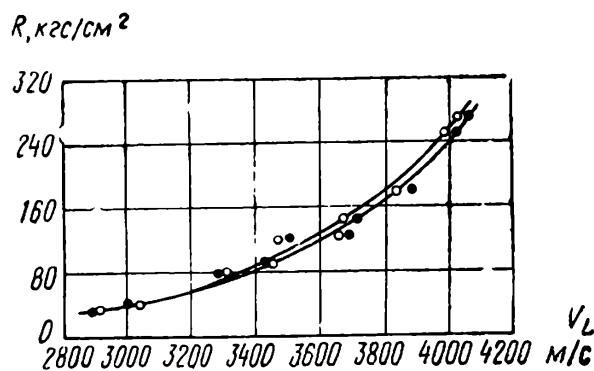


Рис. 2.14. Измерение скорости распространения с использованием различных контактных материалов  
○ — контактный материал пластин; ● — контактный материал вазелин

в том случае, когда сечение балки в середине пролета тоньше, рекомендуется то, что и в предыдущем пункте;

**плиты** на двух опорах: в пролете, в двух взаимно перпендикулярных направлениях, расположенных под углом  $45^\circ$  к уложенной арматуре, в сжатой части плиты не меньше трех точек по каждому направлению;

**плиты неразрезные**: в пролете и вблизи опор, в двух взаимно перпендикулярных направлениях, затем аналогично предыдущему случаю; часть точек измерения нужно расположить в пролете с верхней стороны плиты и вблизи опоры с нижней стороны;

**д и а ф р а г м ы** или железобетонные стенки: в зоне одной из арматурных сеток со стороной 0,5—1 м выбирают точку, наиболее удаленную от арматуры;

**образцы** в виде куба рекомендуется испытывать в трех точках, если сторона куба равна 20 см, и минимум в двух точках, если сторона куба равна 10 см. Примеры выбора точек испытания на образцах в виде кубов и цилиндров показаны на рис. 2.13.

Испытание цилиндрического образца с лицевой стороны, т. е. со стороны укладки материала (после изготовления), следует по возможности избегать, если диаметр цилиндра достаточно велик.

При испытаниях образцов небольших размеров следует руководствоваться указаниями, содержащимися в разделе 2.4.2.

Испытания образца в виде высверленного керна необходимо заменить, насколько это возможно, испытаниями бетона в месте, из которого извлекается образец. Следует избегать извлечения образца диаметром меньше 8—10 см.

В том случае, когда испытания образца невозможно избежать, рекомендуется проводить испытания по диаметру при условии, что он не меньше 4-кратного максимального диаметра заполнителя. Образцы большего диаметра, если это возможно, подвергают испытанию после высверливания с тем, чтобы преобразователи располагались по центру площади основания.

Когда необходимо составить подробную карту зон прочности элемента или получить детальную картину скрытых дефектов в ограниченной зоне,

тогда испытания производят по частой сетке с точками испытания, которые покрывают всю площадь элемента. Испытывать образцы можно по указаниям, приведенным выше, при этом необходимо увеличить количество точек испытания в одной определенной зоне.

Разбивка точек испытания производится с помощью уровня или водяного шланга с тем, чтобы надежно обеспечить соответствие между точками излучения и приема импульсов по разным сторонам испытываемого элемента.

#### 2.4.4. Подготовка места испытания. Контактная среда

Точки испытания четко отмечают, так как в них будут устанавливаться пьезопреобразователи. Поверхность образцов после удаления металлической или щитовой опалубки, как правило, очень гладкая, поэтому нет необходимости в ее специальной подготовке. Шероховатая поверхность бетона или же отслоившаяся его часть после снятия деревянной опалубки, в особенности при недостаточном уплотнении бетона по всей площади укладки, требует предварительной подготовки поверхности для обеспечения хорошего контакта между датчиком и бетоном. Осуществление такой подготовки возможно с помощью твердого шлифовального камня.

Для хорошей передачи акустической энергии необходимо применение единого способа присоединения преобразователя к бетону. Материал, используемый для создания акустического контакта, должен легко деформироваться и обладать большим акустическим сопротивлением, быть достаточно вязким, чтобы противостоять вытеканию, а также удалять воздух, оставшийся между плоскостью преобразователя и бетоном даже после заключительного шлифования.

В качестве связующих сред наиболее известны: вазелин, пластилин, гипс, омыляющее вещество, силиконовая паста и пр.

Для измерения скорости распространения импульса с учетом прохождения сквозь соединительную среду можно стараться использовать смазки с максимальной скоростью, а при измерениях затухания нужно стремиться получить максимальное акустическое сопротивление ( $\rho_d V_L$ ) переходной среды.

На рис. 2.14 графически представлено изменение скорости распространения в образцах различной плотности и, следовательно, с различным сопротивлением и шероховатостью поверхности для случая применения вазелина и пластилина; из графика видно, что разница по всему интервалу минимальна.

На рис. 2.15 показано изменение затухания на образцах различной прочности в случаях, когда применяют две контактные среды: вазелин и пластилин. Для бетонов небольшой прочности лучшие результаты получены с применением пластилина.

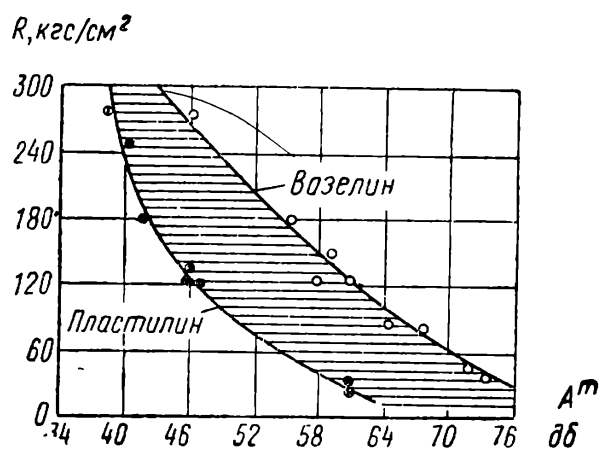


Рис. 2.15. Измерение затухания с использованием различных вязких сред



## 2.4.5. Техника работы с приборами

2.4.5.1. Техника измерения скорости распространения ультразвукового импульса. Выбор испытательной аппаратуры и соответствующих преобразователей производится по данным технического паспорта в зависимости от избранного метода исследования с учетом тех расстояний, которые необходимо проходить ультразвуковому импульсу по бетону при соблюдении требования исключения корректировки во время измерений.

С этой целью следует в первую очередь проверить по паспорту данные питающей сети: величину стабильного напряжения и частоту сети. Нестабильность напряжения или недостаточность его регулируется стабилизатором напряжения, вмонтированным в блок питания прибора. Для нормальной работы прибора необходимо время для создания постоянного теплового режима, для чего он прогревается в течение 15—20 мин. После завершения данного этапа можно переходить к установке нуля, что дает возможность вводить поправку в результаты измерений в процессе эксплуатации аппарата. С этой целью два пьезопреобразователя располагают по обе стороны эталона (с заранее известным временем прохождения ультразвука) и обеспечивают плотный контакт. Сигнал нужно усилить до амплитуды, которая воспринималась бы при измерении в бетоне. Возможны два подхода, которые могут быть использованы при назначении амплитуды сигнала:

1. Максимальная амплитуда, допускаемая схемой аппарата, до появления на экране фонового шума (2.5). Существующая техника усиления позволяет комбинировать усиление сигнала так, чтобы получить отсчет по гипотетической точке пересечения горизонтальной касательной с кривой осциллограммы сигнала (рис. 2.16, а). Эта система имеет преимущество в отсчете показания более близкого к действительной продольной скорости распространения импульса. Данным методом рекомендуется производить все измерения динамических упругих постоянных бетона: модуля упругости, коэффициента Пуассона и т. п.

Однако имеются и такие случаи, когда величины усиления не меняются при неодинаковых условиях измерений для разных толщин бетона, а результаты измерения скоростей для больших толщин зависят от возможности усиления сигнала прибором и главным образом от соотношения «полезный сигнал — фоновый шум», тогда, например, для тощих бетонов или деталей большой толщины определение предполагаемой (гипотетической) точки встречи касательной с горизонтальной линией развертки является очень субъективным.

2. Устанавливается постоянная амплитуда порядка 2,5—3 см, и измеренная по переднему фронту волны полученного сигнала, изобра-

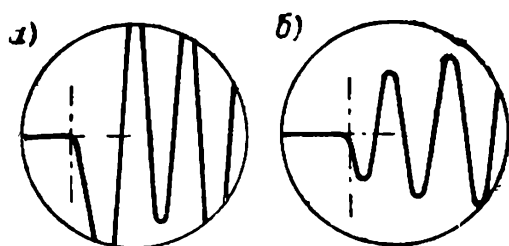


Рис. 2.16. Схема усиления сигнала

а — от максимальной амплитуды; б — от нормальной амплитуды

женного на экране электронно-лучевой трубки (рис. 2.16, б). Такая техника измерений является комбинированной и обычно заключается в наложении точки наименьшего отклонения от вертикали, равного 0,5 мм, на точку отсчета.

Метод имеет преимущество, когда скорость измеряется на одном и том же пути и оценивается качество бетона в целом. Рекомендуется применять его во всех испытаниях, где определяется только прочность бетона.

Метод не имеет преимущества там, где используется групповая скорость, а также не рекомендуется для определения динамических упругих постоянных бетона.

Казалось бы, что принятая техника измерения не может оказывать влияния на окончательный результат. Однако экспериментальным путем доказано, что эта гипотеза неправильна, так как между двумя скоростями может существовать разница, которая изменяется в пределах 1—7% (то, что соответствует предполагаемой разнице по прочности, равной 4—28%), в зависимости от собственной частоты преобразователей, а также от толщины прозвучивания и качества бетона за счет «крутизны» переднего фронта принятого импульса. Указанная выше разница минимальна для испытаний преобразователями с повышенной частотой (выше 100 кГц), установленными на относительно большом расстоянии (больше 50 см) на бетоне хорошего качества.

После снятия всех показаний на бетоне необходимо проверить выполненную ранее калибровку аппарата. Для этого используется металлический стержень из нержавеющей стали, для которого заранее известна скорость распространения ультразвука. С целью более удобного калибрования берут не менее двух длинных стержней, чтобы была возможность устанавливать дифференцированные поправки по длине шкалы.

Если первоначальная калибровка отличается от окончательной, необходимо ввести поправки во времени с помощью интерполяции между калибровкой начальной и конечной в зависимости от местоположения и времени снятия показаний на бетоне. В большинстве случаев разница между двумя калибровками незначительна.

Методика корректировки измерений, выполненных преобразователями с различной собственной частотой для интервала частот 40—100 кГц, и необходимые поправки приведены в разделе 2.5.1.

Следует дать частные указания о необходимости согласования размеров образцов, на которых производятся испытания. Для получения скорости продольных волн необходимо, чтобы все размеры образца превышали величину  $2\lambda$ . Особенно важным это является для поперечных размеров образца. Невыполнение этих условий приводит к изменениям скорости распространения ультразвука (см. раздел 2.5.1).

**2.4.5.2. Техника измерения затухания импульса.** В последнее время затрачиваются большие усилия на уточнение методики и техники измерения затухания импульса в бетоне. В основном признаны два метода, хотя каждый из них не лишен недостатков и может критиковаться.

1. Первый метод разрабатывается, например, в институтах INCERC (Румыния) и TNO—Delft (Голландия), где измеряются амплитуды принятых импульсов [12, 13]. Практика показывает, что лучше производить изме-

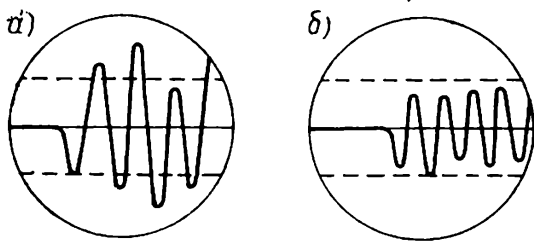


Рис. 2.17. Измерение затухания импульса  
 а — от переднего фронта волны; б — от максимальной амплитуды

рения амплитуды переднего фронта волны (рис. 2.17, а) или максимальной амплитуды (рис. 2.17, б).

Испытания показывают, что между этими двумя измерениями существует корреляционная зависимость (рис. 2.18), так как на большей части интервала между кривыми (в области нормальной плотности бетона) может быть приблизительно линейная зависимость

$$A' = A^m + 5,5 \text{ dB}, \quad (2.6)$$

где  $A'$  — величина затухания амплитуды переднего фронта;  $A^m$  — величина затухания максимальной амплитуды;  $\text{dB}$  — децибел, единица измерения усиления или затухания сигнала.

Из этих двух измерений следует отдать предпочтение измерению по переднему фронту волны, поскольку оно меньше зависит от интерференции различных типов волн.

Корреляционная зависимость (2.6) предусматривает равномерное давление на преобразователи и выравнивание шероховатой поверхности. Второе требование осуществляется с помощью выравнивания поверхности бетона шлифовальным камнем или же применением металлической опалубки. Для осуществления первого требования было предложено несколько устройств, из которых одно — схема с пружинным приспособлением для испытания куба — показано на рис. 2.19. Для определения необходимой силы прижатия преобразователей были выполнены измерения изменений затухания в зависимости от этой силы (рис. 2.20).

Измерения показывают, что при достижении силы прижатия около 40 кгс ( $\sigma = 4 \text{ кгс/см}^2$ ) не происходит заметных изменений затухания даже в том случае, когда применяют такую вязкую соединительную среду, как пластилин, рекомендуемый для таких измерений (см. раздел 2.4.4).

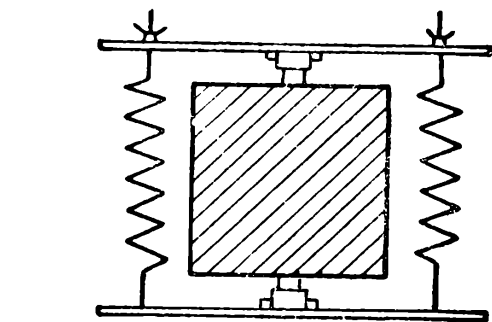
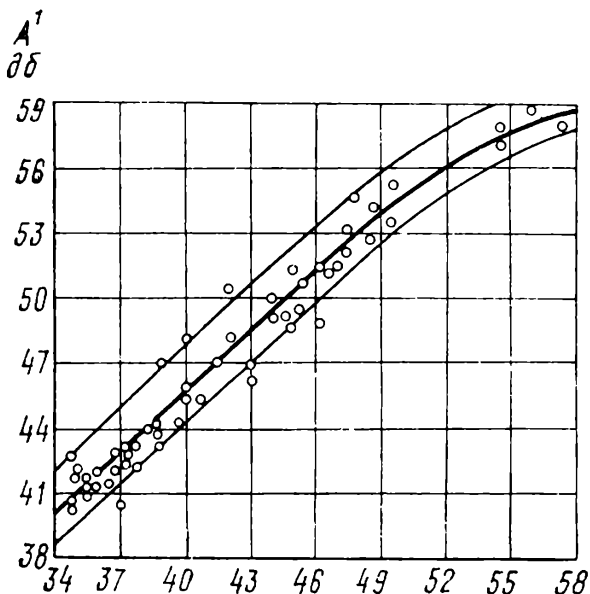


Рис. 2.19. Эскиз пружинного держателя пьезопреобразователей

Рис. 2.18. Соотношение между разными методами измерения затухания

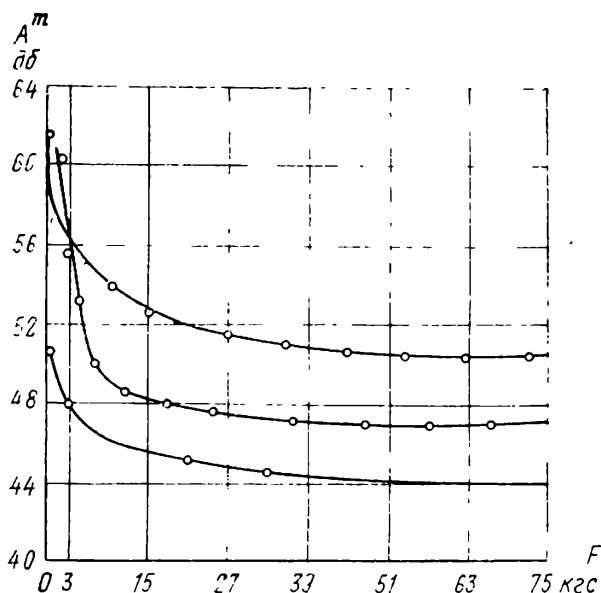


Рис. 2.20. Изменение затухания в зависимости от силы прижатия

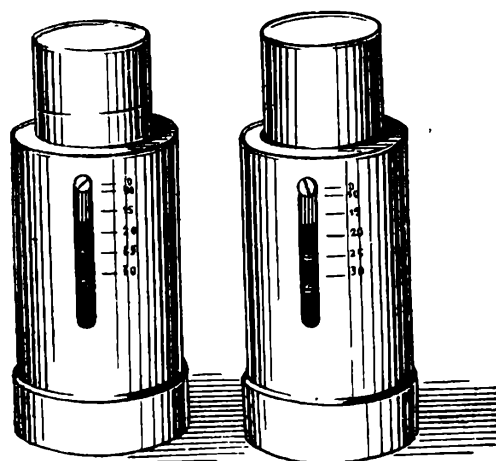


Рис. 2.21. Приспособление для прижатия пьезопреобразователя

INCERC в последнее время разработал новое приспособление, которое применяется для установки преобразователей на бетоне, с необходимой силой прижима независимо от конфигурации элемента (рис. 2.21).

Параллельно были проведены исследования в Голландии в TNO — Delft и разработана техника измерения затухания с использованием гидравлической подушки.

2. Другой способ измерения затухания получил развитие в Научно-исследовательском институте по строительству (ETI) в Будапеште и в Академии наук ЧССР (ČSAV) в Братиславе [14, 23]; он основан на результатах анализа многократного отражения импульса на участке расположения излучатель—приемник. Если шкала времени выбрана удачно, то на экране электронно-лучевой трубки появляется многократное отражение импульса<sup>1</sup> (рис. 2.22).

Если приближенно выразить огибающую кривую в виде экспоненты, то получим выражение

$$y = y_0 e^{-\alpha x}, \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  — коэффициент затухания.

Этот коэффициент может быть получен путем измерения пути  $\Delta l$ , на котором амплитуда сигнала снижается на величину  $1/e = 1/2,71$  от первоначального значения.

В этом случае  $\alpha$  может быть получено из уравнения

$$\alpha = \frac{1}{\Delta l} = \frac{1}{\Delta t v_L} [см^{-1}], \quad (2.8)$$

где  $v_L$  — скорость распространения импульса в испытываемом бетоне. Обычно  $\alpha$  выражается в  $см^{-1}$ .

<sup>1</sup> Раньше, чем упоминают авторы, этот метод был разработан И. А. Спинцисом в СССР и реализован в серийно выпущенном с 1965 г. приборе ДУК-20 (примеч. науч. ред.).

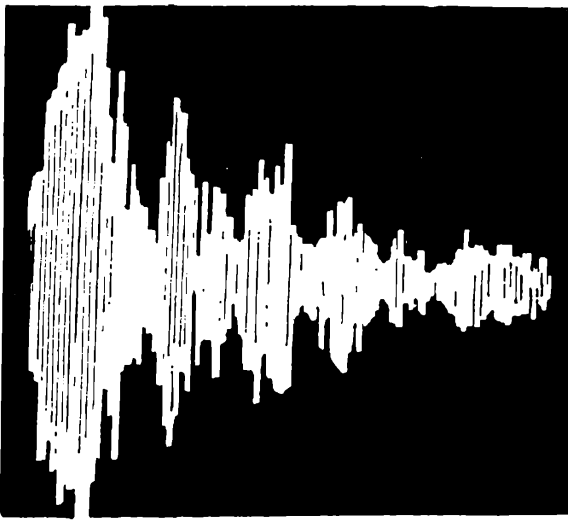


Рис. 2.22. Оциллограмма отраженного импульса

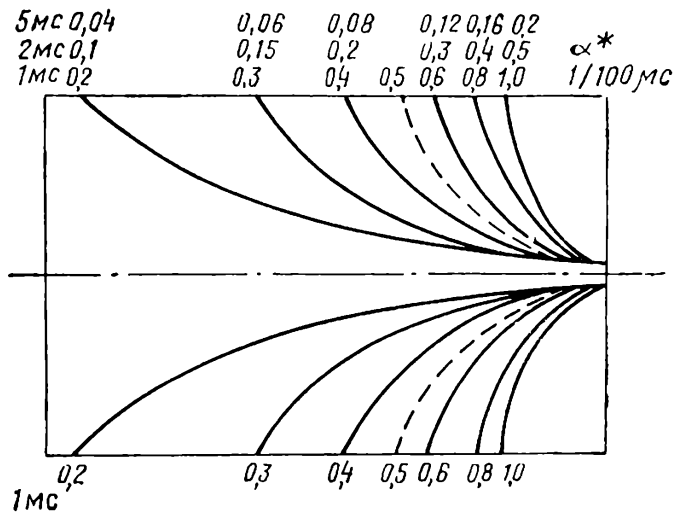


Рис. 2.23. Кривые  $\alpha^*$  для различных шкал времени

Вместо коэффициента затухания  $\alpha$  можно использовать ему подобный коэффициент  $\alpha^*$ , который связывает огибающую кривую максимальных амплитуд колебания непосредственно со временем:

$$y = y_0 e^{-\alpha^* t}. \quad (2.9)$$

Если  $t$  — тот же самый интервал, на котором снижается амплитуда сигнала на  $1/e$  от первоначального значения, то  $\alpha^*$  дается выражением

$$\alpha^* = \frac{1}{\Delta t} [c^{-1}]. \quad (2.10)$$

Для этого коэффициента Галан наметил для разных шкал времени в соответствии с режимом работы прибора фирмы RECO (1, 2, 5 мкс) огибающие кривые уменьшения амплитуды сигнала, как результат многократного его отражения (рис. 2.23). На этом графике даны кривые, соответствующие различным коэффициентам  $\alpha^*$ . Эти кривые можно использовать для прямого определения коэффициента  $\alpha^*$  или же можно использовать для вычисления коэффициента  $\alpha$  в соответствии с уравнением

$$\alpha = \frac{\alpha^*}{v_L}. \quad (2.11)$$

## 2.5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА

Ультразвуковой импульсный метод в настоящее время является наиболее распространенным неразрушающим методом испытания бетона, что видно из целого ряда работ [15, 16, 17]. Аргументы, широко изложенные в разделе 2.1, объясняют причину появления этих работ. Однако существует также и риск получить ошибочные результаты [18, 19, 20] по сравнению с другими методами неразрушающих испытаний при неправильном применении метода или неучете упомянутых раньше ограничений. Вот почему,

в первую очередь, при применении метода необходимо учитывать физические проблемы, которые не связаны непосредственно с методом, но без понимания которых нельзя избежать грубых ошибок [21, 22]. К таким проблемам относятся: влияние размеров образца, частота передачи сигнала, температура и влажность бетона во время испытания, расположение, объем и диаметр арматуры, содержащейся в бетоне.

### 2.5.1. Влияние частоты сигнала и размеров образца на скорость распространения импульса

В связи с влиянием собственной частоты преобразователя на скорость распространения ультразвука RILEM [24] среди научных работников была распространена анкета, которая показала, что по мнению 60% опрошенных частота влияет на скорость, в то время как 40% дали отрицательный ответ. Эти расхождения в ответах объясняются применением разной техники измерения скорости распространения ультразвука. Измерения с использованием максимальной амплитуды сигнала (см. раздел 2.4) показали, что влияние не наблюдается [25]. Наоборот, измерения с использованием стандартной амплитуды сигнала (см. раздел 2.4) показали, что имеет место влияние и что обнаруживаются признаки увеличения скорости распространения по мере того, как увеличивается частота сигнала. Измерения, выполненные в интервале частот 20—100 кгц, показали [26], что изменения скорости распространения в интервале этих частот около 100 м/с (рис. 2.24).

В других опытах влияние оказала длина базы, на которой производились измерения. И в этой области мнения по анкете были различными, и их следует разделить на три категории:

не существует заметного влияния по крайней мере в пределах величины базы от 10 см;

существует влияние базы по крайней мере до пределов 20—40 см и обнаруживаются признаки увеличения скорости распространения по мере того, как увеличивается длина базы прозвучивания;

существует влияние и обнаруживаются признаки снижения скорости распространения по мере того, как увеличивается длина базы.

Между ответами первой и второй категории не существует принципиальной разницы, она состоит лишь в методике проведения измерений и возможных объяснениях процесса. Сторонниками первого и второго мнения, как правило, являются научные работники лабораторий, в которых измерение производят с ограниченной амплитудой<sup>1</sup>. Изменение скорости распространения импульса допускается из-за различий в толщине контактной смазки,

---

<sup>1</sup> Вопрос о скорости продольных волн, измеренной по ограниченной или максимальной амплитуде переднего фронта импульса, пересекающего горизонтальную линию развертки, неоднократно дискутировался в работах советских исследователей. См. Защук И. В. Ультразвуковые импульсные приборы для исследования упругих свойств твердых тел. Передовой научно-техн. и производств. опыт. Тема 33. Приборы для исследования структуры металлов и материалов. АН СССР. Изд. ВНИИТИ, № П-57-25/2, 1958. Вайншток И. С. Радиоэлектроника в производстве сборного железобетона. М., Госстройиздат, 1961. Крылов Н. А. Электроакустические и радиометрические методы испытания материалов и конструкций. Л. — М., Госстройиздат, 1963 (примеч. науч. ред.).

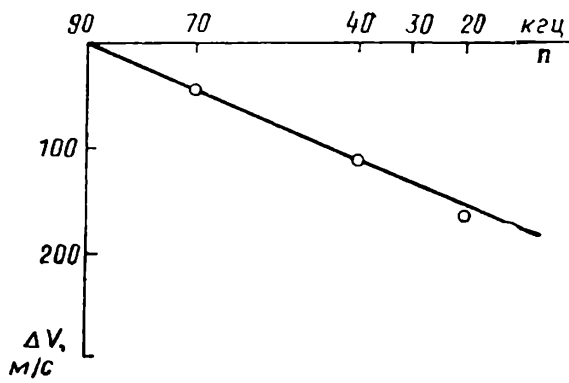


Рис. 2.24. Изменение скорости в зависимости от частоты сигнала

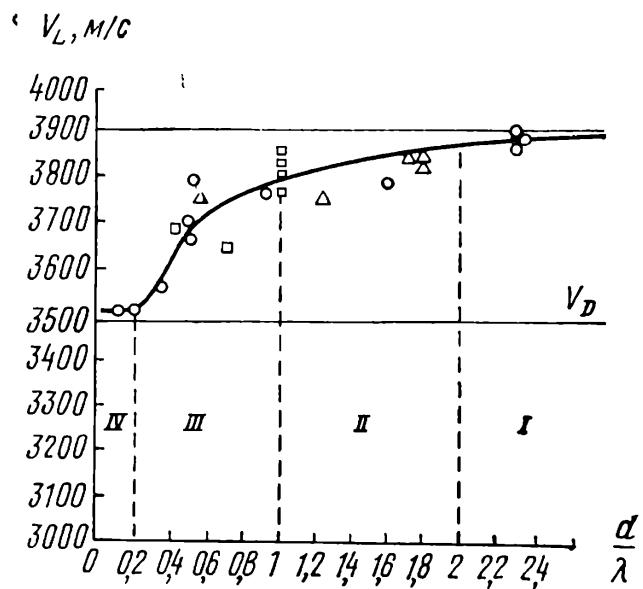


Рис. 2.25. Изменение скорости в зависимости от размеров конструкции →

что, возможно, объясняется различием в условиях контакта и влиянием переходного слоя на общее время распространения волны в бетоне.

В технике измерения с ограниченной амплитудой было бы правильным избегать измерений на очень маленьких расстояниях (меньше 15 см).

Мнение третьей категории участников анкеты, которые утверждали, по существу, снижение скорости распространения с увеличением расстояния, объясняется применением аппаратуры, в которой используется техника измерения максимальных амплитуд. При испытаниях одновременно с увеличением расстояния, с одной стороны, изменяется спектральный состав импульса и в первую очередь теряется высокочастотная составная часть; с другой стороны, уменьшается количество энергии и, следовательно, падает амплитуда импульса как раз в области частот, которые регистрируются приемником. Оба явления приводят к кажущемуся снижению скорости распространения и перемещению точки, в которой сигнал становится видимым на экране электронно-лучевой трубки<sup>1</sup>.

К числу факторов, которые нужно учитывать при измерениях, относится влияние поперечных размеров испытываемого образца. В общем случае измеряется скорость распространения продольных волн в бесконечной среде. Однако в зависимости от размеров образца скорость продольных волн в бесконечной среде (массиве) переходит в скорость волны в стержне, пластине или же в скорость поверхностной волны, которые по величине меньше, чем скорость продольных волн в массиве. Исследования, выполненные на образцах с различными размерами, показали (рис. 2.25), что до тех пор, пока поперечный размер  $d$  отвечает условию

$$d > 2\lambda, \quad (2.12)$$

<sup>1</sup> Подробнее этот вопрос освещен в работе Филонидова А. М., Третьякова А. К. «Контроль бетона ультразвуком в гидротехническом строительстве». М., «Энергия», 1969. Авторы упомянутой работы дают не только качественное толкование известному из наблюдений явлению снижения скорости упругих продольных волн с расстоянием, но и предлагают теоретическое описание этого факта, основываясь на математической модели поглощающей среды, предложенной в работе У. Фаттермана (примеч. науч. ред.).

где  $\lambda$  — длина волны ультразвука, будет соблюдено соответствие скорости распространения значениям величин для массива (зона I). В зоне II условие распространения волн определяется из неравенства

$$\lambda < d < 2\lambda, \quad (2.13)$$

из которого видно влияние поперечного размера образца, приводящее к снижению скорости распространения на 2,5—3%, что соответствует возможной ошибке, при оценке прочности в пределах 10%. Риск внести погрешность в измерение в этой зоне довольно большой, даже для преобразователя, имеющего среднюю частоту (40—80 кгц).

Следующая зона определяется неравенством

$$0,2\lambda < d < \lambda. \quad (2.14)$$

В этой зоне наблюдается существенное изменение скорости распространения в пределах 6—7% (см. рис. 2.25), так как график охватывает оставшуюся часть интервала между зонами, отделяющими скорость распространения волны в массиве от скорости распространения волны в стержне. Ошибки в оценке прочности реальных элементов при выполнении измерений в этом интервале могут достигнуть 30—40%, что не может быть допущено.

Практически риск получить ошибочные результаты при выполнении измерений в этой зоне довольно большой в случае, когда применяются преобразователи с низкой частотой (20—40 кгц) и для калибровки используются образцы с поперечными размерами 7—20 см. Следует признать правильной существующую до сих пор тенденцию использовать в испытаниях ультразвуком преобразователи с собственной частотой выше 40 кгц и образцы с поперечными размерами больше 10 см.

Крайняя зона (зона IV) определяется из неравенства

$$d < 0,2\lambda. \quad (2.15)$$

В этом случае это те измерения, которые относятся к скорости распространения волны в стержне. Если динамический коэффициент Пуассона известен или его можно определить по измеренной скорости  $v_D$ , тогда можно скорость распространения продольных волн  $v_L$  вычислить из соотношения

$$v_L = v_D \sqrt{\frac{1 - \nu_d}{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}}. \quad (2.16)$$

Задавшись значением  $\nu_d = 0,25$ , справедливым для затвердевшего бетона, можно переписать выражение (2.16) в виде приближенного равенства

$$v_L \approx 1,1v_D. \quad (2.17)$$

Вероятность того, что измерения могут быть отнесены зоне к IV, крайне незначительна, даже для преобразователей с очень низкой частотой (20 кгц), поскольку необходимо, чтобы поперечные размеры образца были бы и меньше 4 см.

Во всех изложенных ранее соображениях принято, что по двум поперечным направлениям распространение волн соответствует условиям, сформулированным в неравенствах (2.12)—(2.15). Если только один из поперечных размеров удовлетворяет этим условиям, мы имеем пластину, тогда эти



неравенства на этот случай не распространяются. Волны, возникающие в пластине, также являются волнами растяжения или продольными волнами, но скорость их распространения  $v_p$  меньше, чем скорость продольных волн в массиве:

$$v_L = v_p \frac{1 - v_d}{\sqrt{1 - 2v_d}}, \quad (2.18)$$

но больше по величине, чем скорость волн в стержне. Таким образом, задавшись для затвердевшего бетона  $v_d = 0,25$ , как и в выражении (2.17), получим

$$v_L \approx 1,06v_p \quad (2.19)$$

Волны, аналогичные указанным выше, обнаружены в плитах с толщиной, меньшей длины волн, и чтобы не было значительного риска измерить скорость, заметно отличающуюся от скорости продольной волны в массиве для испытания плит толщиной 10 см, необходимо работать с преобразователями с собственной частотой свыше 40 кГц\*.

### 2.5.2. Влияние влажности и температуры на скорость распространения ультразвука в бетоне

Этот раздел посвящен влиянию изменения влажности и температуры бетона в затвердевшем состоянии в нормальном диапазоне их изменения на результаты ультразвуковых измерений — вопросу, которому мало уделялось внимания.

Влиянию температуры и влажности для специальных условий, начиная с процесса твердения, посвящается раздел 2.5.9. Следует отметить, что влияние местных атмосферных условий на измеренную скорость необходимо корректировать для того, чтобы получить данные, соответствующие стандартным условиям измерения, например 20—25° С, и относительной влажности воздуха 60%.

Влияние изменения влажности в процессе испытания бетона на результаты рассматривается отдельно. По различным материалам известно следующее: прозвучивание обожженной керамики или мелового известняка, погруженных в воду, обнаруживает уменьшение скорости распространения (рис. 2.26, а, б); в затвердевшем бетоне увлажнение, наоборот, увеличивает скорость распространения (рис. 2.27, а, б). Разница заключается в меха-

---

\* В дополнение к рекомендациям авторов можно назвать работы советских исследователей, в которых указывается на необходимость учета, помимо отношения  $d/\lambda$ , еще и отношения  $l/\lambda$ , где  $l$  — длина образца или элемента. См. Дзенис В. В., Липовский В. Я. Исследование влияния геометрических размеров образцов на скорость распространения и декремент затухания продольных колебаний в фторопласте. «Механика полимеров», 1966, № 4. Стрелков Г. П. Об измерении модуля упругости и коэффициента Пуассона с помощью ультразвука. «Применение достижений современной физики в строительстве». Сб. под. ред. Н. В. Морозова. М., Стройиздат, 1967. Почтовик Г. Я. и др. О скоростях распространения продольных волн в строительной керамике. — В сб.: Экспериментальные исследования инженерных сооружений. Доклады и сообщения на II симпозиуме в Ленинграде. Вып. 6. М., Центр. НИИ по строительству и архитектуре, 1969 (примеч. науч. ред.).

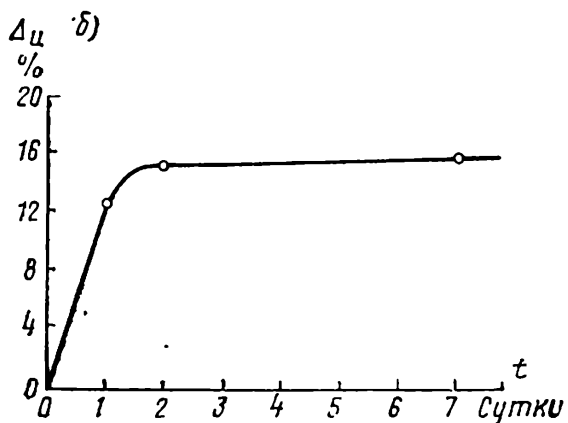
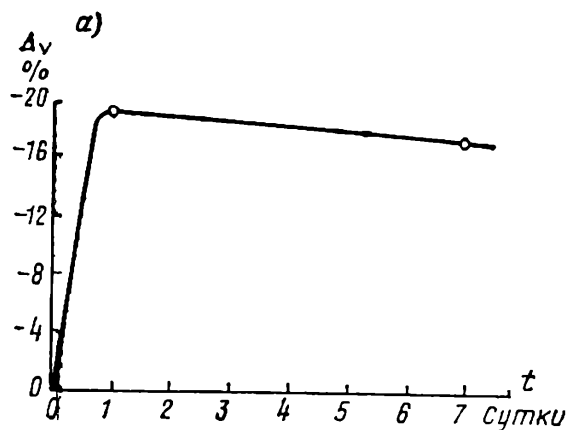


Рис. 2.26. Изменение скорости и влажности в меловом известняке  
а — скорость; б — влажность

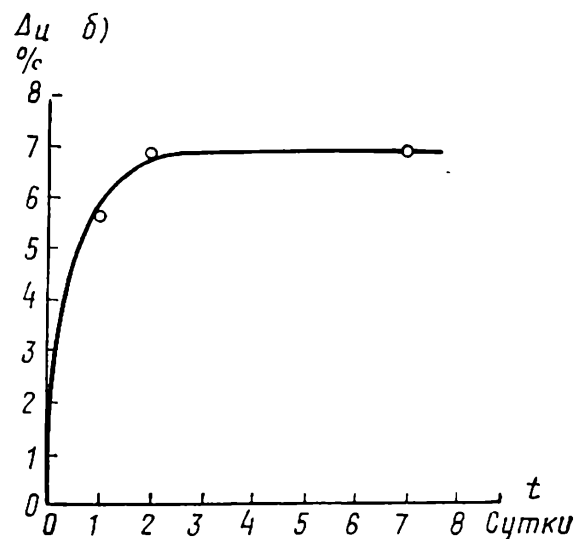
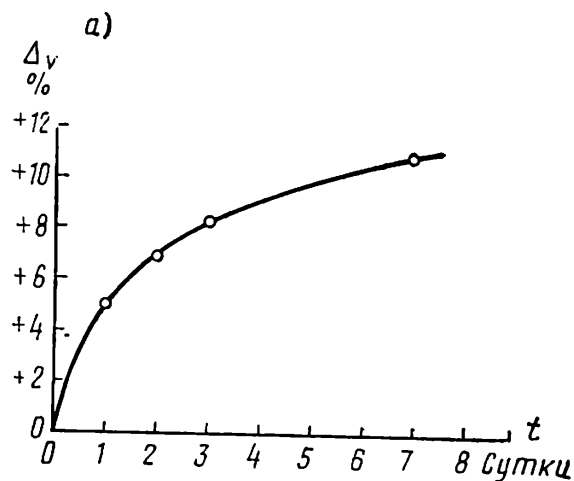


Рис. 2.27. Изменение скорости и влажности затвердевшего бетона  
а — скорость; б — влажность

низме действия, и можно представить себе, что для одних материалов во время нахождения тела в воде нарушается часть связей и ухудшается структура, для других материалов увеличивается количество связей и в результате структура укрепляется. Бетон можно отнести к этой последней категории материалов<sup>1</sup>.

Увеличение скорости распространения ультразвука приблизительно на 5% за счет указанных выше причин может привести к ошибке до 20% в определении прочности бетона. На практике такое положение имеет значе-

<sup>1</sup> Объяснение, приводимое авторами, слишком упрощено, поэтому отсылаем читателя к работам в которых экспериментально и теоретически подробно рассмотрен этот вопрос. См. В а й н ш т о к И. С., М и з р о х и Ю. Н. Автоматический контроль прочности бетона в условиях тепловой обработки ультразвуковым импульсным методом. Труды Международной конференции по проблемам ускорения твердения бетона при изготовлении сборных железобетонных конструкций. М., Стройиздат, 1964.

Петкевич Г. И., Вербицкий Т. З. Исследование упругих свойств пористых геологических сред, содержащих жидкости. Киев, «Наукова думка», 1965.

Дзенис В. В., Лапса В. Х. Ультразвуковой контроль твердеющего бетона. Л., Стройиздат, 1971.

Морщинин В. Н., Рынин Н. Л. Оценка качества бетона с учетом его влажности. «Бетон и железобетон», 1969, № 7 (примеч. науч. ред.).

ние при испытаниях бетона на строительстве, когда до испытания бетон был увлажнен дождем или же хранился под водой (гидротехнические конструкции).

Другой фактор, который необходимо принять во внимание, — температура при испытании. До тех пор, пока температура бетона находится в пределах 5—30° С, несмотря на некоторые изменения скорости с температурой, снижение скорости от увеличения температуры может быть принято незначительным. За этим пределом температур, если измерения скорости применяют для определения прочности бетона, необходимо полученную скорость приводить к скорости, эквивалентной 20° С. Исследования, выполненные в INCERC, показали, что эти поправки зависят от влажности бетона, в особенности в области пониженных температур, и приведены в табл. 2.1 [27].

Таблица 2.1. Поправки на температуру для скорости распространения ультразвука

Температура в °С	Поправки в %	
	хранение на воздухе	хранение в воде
+60	+5	+4
+40	+2	+1,7
+20	0	0
0	-0,5	-1
< -4	-1,5	-7,5

Снижение скорости отмечено в диапазоне температур от 40 до 60° С, которое может быть за счет увеличения внутренних микротрещин в бетоне; кроме того, в этой области возникает уменьшение предела прочности при сжатии бетона.

Увеличение скорости распространения при температуре, соответствующей точке замерзания воды, есть результат превращения несвязанной воды в бетоне ( $v_L = 1450$  м/с) в лед ( $v_L = 3500$  м/с).

Поправки допускаются при условии, что бетон в момент испытания имеет температуру, указанную в табл. 2.1. Не допускаются поправки при размораживании бетона, который выдерживал, например, повторные циклы замораживания-оттаивания. Для отрицательных температур поправки предназначены для испытаний на строительстве зимой, когда относительно продолжительное время температура сохраняется ниже -4° С.

### 2.5.3. Влияние арматуры на скорость распространения ультразвука в бетоне

Арматура влияет на скорость ультразвука благодаря более высокой скорости распространения в ней, чем в бетоне. По этой причине в определенных условиях скорость распространения, измеренная в железобетоне, больше, чем измеренная в таком же неармированном бетоне, так как импульс распространяется частично по арматуре. Кажущееся увеличение скорости распространения зависит от ориентации стержней по отношению к направлению испытания, от расстояния их до линии, соединяющей излучатель с приемником (трассы прозвучивания), от количества и диаметра арматуры.

**2.5.3.1. Ось стержней перпендикулярна направлению испытания.** Рассматривается случай наиболее частого испытания железобетонных элементов, в особенности колонн и балок. Максимальное влияние стержней сказывается по линии излучатель — приемник, проходящей в зоне пакета продольных стержней в случае, когда импульс передается полностью через каждый стержень по его диаметру (рис. 2.28). В этих условиях время распространения  $t$ , измеренное прибором, выражается так:

$$t = \frac{l - l_a}{v_b} + \frac{l_a}{v_a}, \quad (2.20)$$

где  $l$  — расстояние между излучателем и приемником;  $l_a = \sum d_i$  — сумма диаметров стержней по поперечному сечению (см. рис. 2.28);  $v_b$  — фактическая скорость распространения в арматуре;  $v_a$  — скорость распространения в бетоне.

Если заменим в отношении (2.20) измеренное время  $t$  отношением

$$t = \frac{l}{v}, \quad (2.21)$$

в котором  $v$  представляет собой измеренную скорость без учета арматуры, и если все выразим в зависимости от  $v_b$ , то получим выражение

$$\frac{v_b}{v} = \frac{1 - \frac{l_a}{l}}{1 - \frac{l_a v}{l v_a}}, \quad (2.22)$$

которое показывает, на какую величину нужно умножить значение измеренной скорости  $v$ , чтобы получить фактическую скорость распространения в бетоне  $v_b$ . Этот коэффициент зависит от отношения пути прохождения импульса по арматуре к общему пути  $\frac{l_a}{l}$  и отношения между измеренной скоростью и скоростью в арматуре  $\frac{v}{v_a}$ . Этот коэффициент для бетона приводится в табл. 2.2.

При определении табличных данных было принято  $v_a = 5600$  м/с — промежуточное значение между скоростью продольных волн в бесконечной среде  $v_{La} = 5850$  м/с и скоростью в стержне  $v_{Da} = 5150$  м/с.

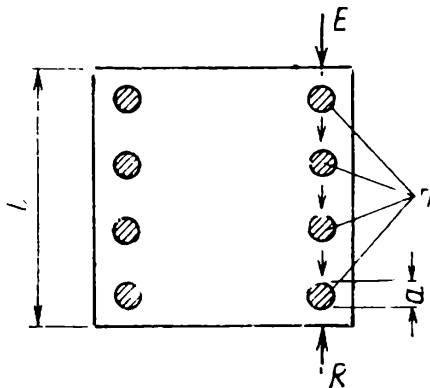


Рис. 2.28. Арматура перпендикулярна направлению распространения ультразвука

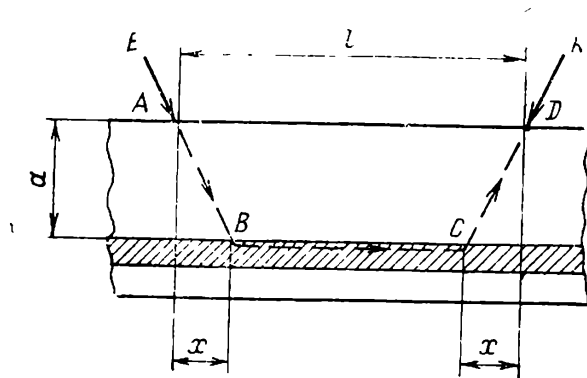


Рис. 2.29. Арматура параллельна направлению распространения ультразвука

Практически поправочный коэффициент  $\frac{v_b}{v}$  может иметь значения, несколько бóльшие, чем приведенные в табл. 2.2, вследствие непрямолинейности арматурных стержней и несовпадения линий между излучателем — приемником и расположением арматуры в плане. Влияет и тот факт, что только небольшая часть энергии импульса переносится полностью через каждый диаметр стержня; остаток энергии «проходит путь», бóльшая часть которого попадает на бетон, меньшая — на арматуру.

**2.5.3.2. Ось стержней параллельна направлению испытания.** Это относится к многочисленным испытаниям плит и балок поверхностным методом. На рис. 2.29 приведена схема испытания. На схеме  $a$  — расстояние от плоскости испытания до поверхности стержня и  $l$  — расстояние между излучателем и приемником.

Время распространения ультразвука по ломаной линии  $ABCD$  определяется так:

$$t_1 = \frac{2\sqrt{a^2 + X^2}}{v_b} + \frac{l - 2X}{v_a}, \quad (2.23)$$

в котором  $X$  — отрезок, определяемый наклоном прямой  $AB$ , а  $v_a$  и  $v_b$  — значения скоростей, приведенные в предыдущем разделе. Величина  $X$  определяется из условия минимума времени распространения волны:

$$\frac{dt_1}{dX} = 0; \quad (2.24)$$

решая его, получим

$$X = \frac{av_b}{\sqrt{v_a^2 - v_b^2}}. \quad (2.25)$$

Подставляя соотношение (2.25) в (2.23), получим

$$t_1 = \frac{l}{v_a} + 2a \frac{\sqrt{v_a^2 - v_b^2}}{v_a v_b}. \quad (2.26)$$

Если

$$t_1 > t_2, \quad (2.27)$$

где  $t_2$  — время распространения по прямой между  $A$  и  $D$  в бетоне,

$$\text{и } t_2 = \frac{l}{v_b}, \quad (2.28)$$

тогда не ощущается влияние арматуры на результаты измерения. Заменяя в неравенстве (2.27) выражение  $t_1$  и  $t_2$  их значениями, взятыми соответственно из (2.26) и (2.28), можно получить условие

$$\frac{a}{l} \geq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_a - v_b}{v_a + v_b}}. \quad (2.29)$$

Если условие (2.29) не выполняется, наблюдается влияние арматуры на результаты измерения. Фактическая скорость распространения ультразвука в бетоне  $v_b$  приведена в данном случае уравнением

$$v_b = \frac{v_a}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_a}{v} - 1\right)^2 \frac{l^2}{4a^2}}}, \quad (2.30)$$

где  $v$  — измеренная скорость, определенная в предположении, что распространение волны происходит по прямой  $AD$ .

Поправочные коэффициенты к измеренной скорости  $v$  для получения фактической скорости распространения  $v_b$  получаются путем ввода на основе соотношения (2.27) значений, приведенных в табл. 2.3, в зависимости от отношений  $\frac{a}{l}$  и  $\frac{v_a}{v}$ .

Таблица 2.2. Поправочные коэффициенты к измеренной скорости в бетоне с арматурой, расположенной перпендикулярно направлению испытания

$\frac{l_a}{l}$	$\frac{v_b}{v}$		
	$v=3000$ м/с	$v=4000$ м/с	$v=5000$ м/с
$\frac{1}{12}$	0,96	0,97	0,99
$\frac{1}{8}$	0,94	0,96	0,99
$\frac{1}{6}$	0,92	0,94	0,98
$\frac{1}{4}$	0,88	0,92	0,97
$\frac{1}{3}$	0,83	0,88	0,95
$\frac{1}{2}$	0,69	0,78	0,9

Таблица 2.3. Поправочные коэффициенты к измеренной скорости в бетоне с арматурой, расположенной по направлению испытания

$a/l$	$\frac{v_b}{v}$			
	$\frac{v_a}{v} = 1,6$	$\frac{v_a}{v} = 1,4$	$\frac{v_a}{v} = 1,2$	$\frac{v_a}{v} = 1,1$
1/20	—	0,34	0,54	0,79
1/15	0,35	0,45	0,67	0,88
1/10	0,48	0,63	0,85	0,98
1/7	0,69	0,82	0,99	1
1/5	0,89	0,99	1	1
1/4	1	1	1	1

Из табл. 2.3 видно, что влияние продольной арматуры, расположенной на расстоянии  $a$  (рис. 2.29), большем, чем  $0,2 - 0,25l$ , не принимается во внимание.

Следует отметить также, что влияние продольной арматуры на результаты испытаний может быть во много раз более заметным, чем влияние поперечной арматуры.

**2.5.3.3. Элементы, армированные по двум направлениям.** При таком расположении арматуры рекомендуется испытание элемента по направлению, соответствующему биссектрисе угла, образуемого двумя направлениями арматуры.

## 2.5.4. Ультразвуковой контроль твердения бетона на цементе и других вяжущих

Как известно, твердение бетона происходит благодаря гидратации цемента, а точнее следующих компонентов: двухкальциевого силиката ( $C_2S$ ), трехкальциевого силиката ( $C_3S$ ), четырехкальциевого алюмоферрита ( $C_4AF$ ) и трехкальциевого алюмината ( $C_3A$ ).

Процессы, которые происходят во время гидратации этих компонентов, и их взаимодействие могут быть также изучены с помощью ультразвука [28, 51].

Измерение скорости распространения ультразвука можно начинать спустя 4 ч после изготовления. Измерения, проведенные в течение 24 ч после изготовления, показали, что первые характерные изменения на графике скорости распространения от времени обнаруживаются между 8—12 ч после изготовления в зависимости от вида цемента (рис. 2.30) и отношения  $B/C$  (рис. 2.31). Эти изменения обнаруживаются в виде неожиданного перелома в ходе кривых скорости распространения в зависимости от времени.

Поскольку график представляет собой как бы связанную точечную систему, все точки на кривой относятся к этой системе [28]. Одна точка находится в месте пересечения прямых, которые можно назвать прямыми, ограничивающими зону точечной системы.

В этой зоне происходит окончание физико-химического процесса, который развивался во время гидратации цемента и значительная часть которого отвечала первому подъему скорости распространения и, следовательно, образованию начальной структуры бетона. Продолжительность этого процесса зависит от водоцементного отношения, как это видно из рис. 2.31: чем

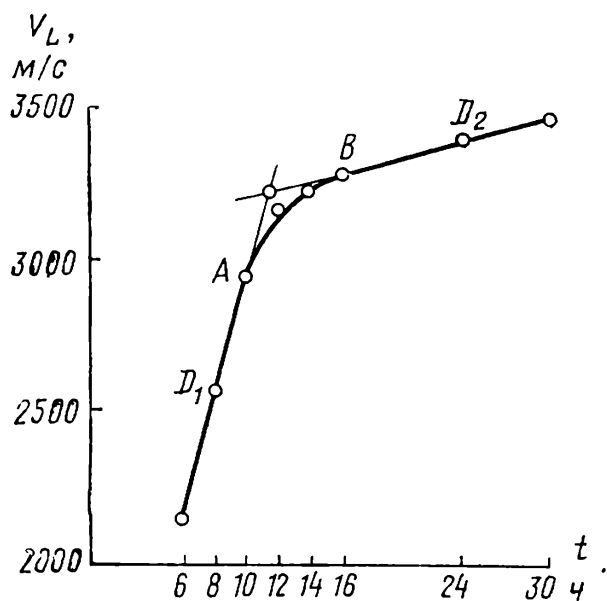


Рис. 2.30. Схватывание быстротвердеющего цемента в первые часы твердения

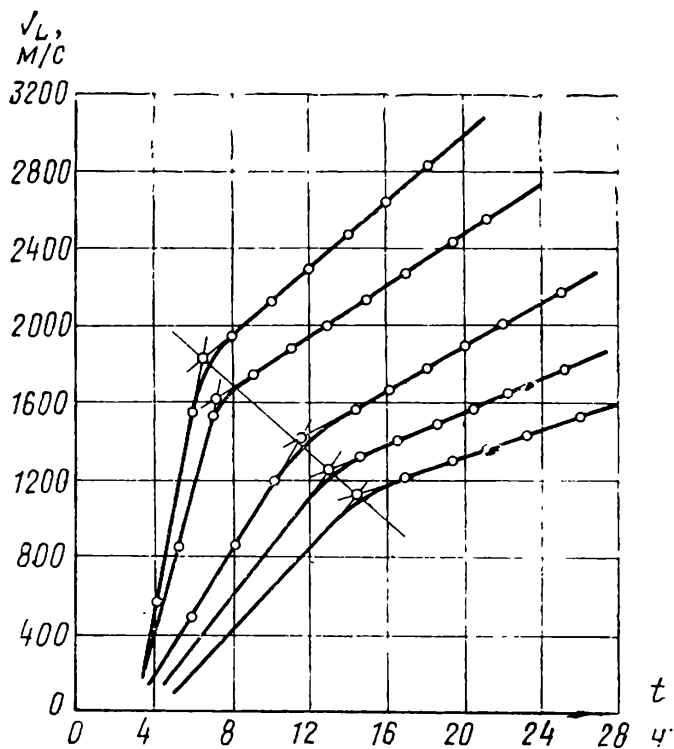


Рис. 2.31. Схватывание портландцемента с различным отношением  $B/C$

дольше проходит процесс, тем больше это отношение [29]. Также повышение водоцементного отношения увеличивает угол двух характерных прямых, вызывая уменьшение зоны связанной точечной системы. Чтобы получить дополнительную информацию относительно природы процесса, были одновременно выполнены измерения прочности на сжатие (рис. 2.32). Несоввершенство представлений о зоне связанной точечной системы становится очевидным при анализе графика изменения прочности, который показывает,

Рис. 2.32. Изменение скорости и прочности бетона в первые часы при одновременно проведенных испытаниях

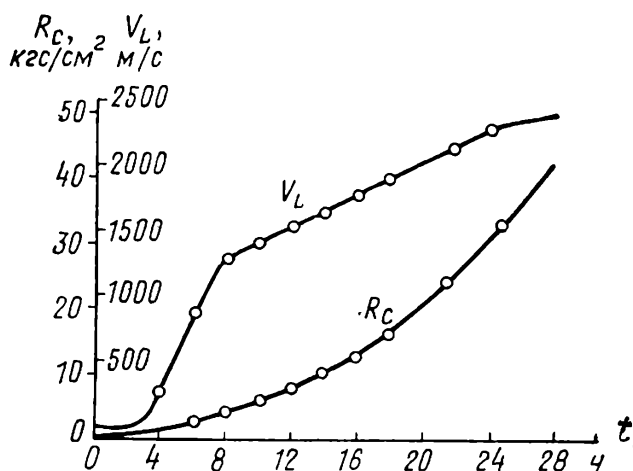
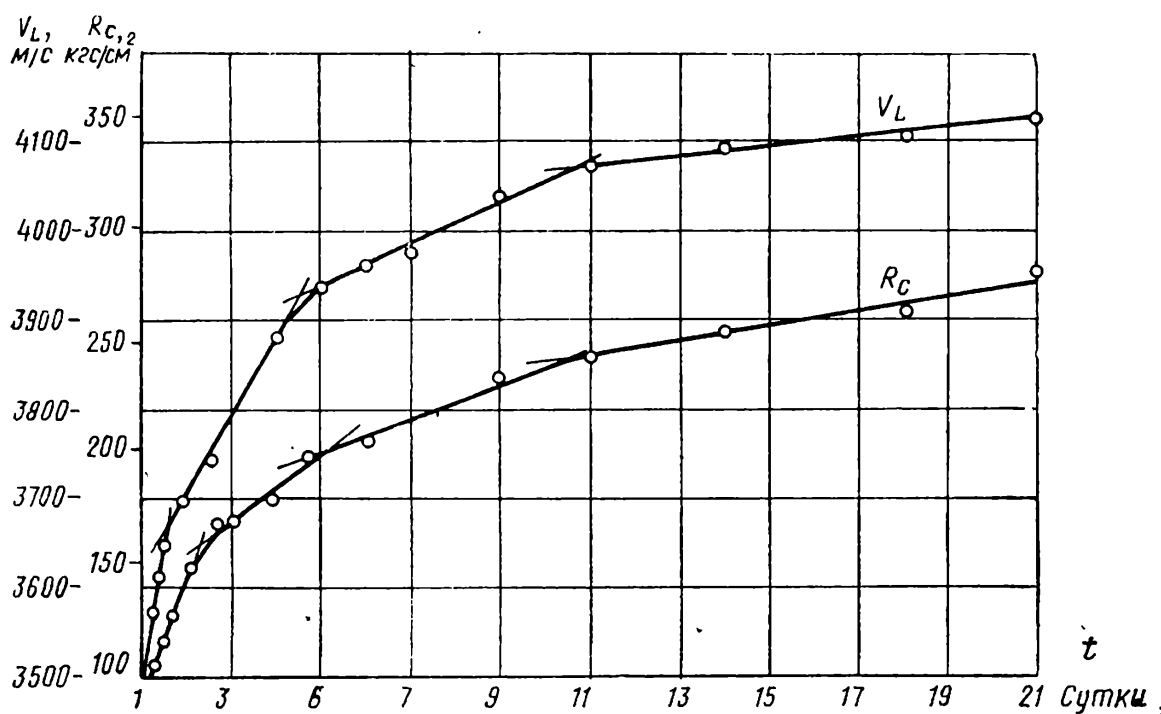


Рис. 2.33. Изменение скорости и прочности бетона за три недели при одновременно проведенных испытаниях



что рассматриваемый процесс не принимает основного участия в формировании прочности бетона. Этот процесс описывает образование начальной структуры бетона и в очень ограниченной степени реагирует на создание первых жестких структурных связей, по которым происходит передача ультразвука.

Непрерывно внимательно наблюдая твердение бетона с помощью ультразвука (рис. 2.33), можно отметить несколько стадий процесса, которые следуют одна за другой во время твердения бетона. Приблизительно по истечении 2 суток после приготовления бетонной смеси, по-видимому, заканчива-



ется стадия процесса, данные по которой можно получить из графиков скорости распространения и прочности, которые аналогичны графику изменения собственных частот продольных колебаний (см. рис. 1.18). Все точки зоны связанной точечной системы, установленные на диаграмме изменения скорости распространения ультразвука, совпадают с точками на диаграмме изменения во времени частот продольных или изгибных колебаний, подтверждая наблюдаемое явление.

Окончание процесса по истечении 2 суток с момента изготовления характеризуется в значительной степени тем, что бетон получает близкую к окончательной механическую прочность. Теперь испытываемый бетон достиг прочности больше  $150 \text{ кгс/см}^2$  по сравнению с  $10\text{—}20 \text{ кгс/см}^2$ , которые он имел в начальной точке зоны связанной точечной системы, т. е. по истечении 10 ч после начала твердения (окончание фазы I). Скорость распространения в этот период увеличивается с  $3300$  до  $3700 \text{ м/с}$ . Эти данные подтверждают тот факт, что по истечении приблизительно 2 суток с момента изготовления закончилась фаза твердения (II), которая в основном определяет окончательную прочность бетона.

Следующая фаза твердения (III), приведенная на рис. 2.33, заканчивается на 5-е сутки от начала изготовления. Окончание периода видно на графиках скорости и прочности. Между второй и третьей точками зоны связанной точечной системы твердение бетона продолжалось довольно ускоренным темпом. Это заметно как на графике распространения скорости ультразвука, которая увеличилась с  $3700$  до  $3930 \text{ м/с}$ , так и на кривой прочности, которая увеличилась с  $150$  до  $200 \text{ кгс/см}^2$ .

Следующая фаза твердения (IV) (см. рис. 2.33) заканчивается на 11-е сутки после приготовления. В этот период наблюдается значительное замедление темпа увеличения скорости распространения, которая изменяется за 6 суток от  $3970$  до  $4080 \text{ м/с}$ , т. е. в 2 раза меньше за период, в 2 раза больший, чем предыдущий. Увеличение скорости в этот период между двумя точками зоны связанной точечной системы и увеличение прочности от  $200$  до  $250 \text{ кгс/см}^2$  соответствует в 2 раза большему периоду. Это указывает на то, что бетон и в данный период еще созрел, но указанный процесс характеризуется меньшим изменением скорости распространения, которым, однако, нельзя пренебрегать при определении окончательной прочности бетона.

Следующая фаза твердения (V) соответствует участкам кривых скорости и прочности (см. рис. 2.33), а также кривой собственных частот, которые полностью выпрямляются, начиная приблизительно с 11 суток, и продолжают до 21—24 суток с момента приготовления. В этот период темп увеличения скорости распространения снижается, она почти не возрастает, однако еще наблюдается ее рост от  $4080$  до  $4120 \text{ м/с}$ ; также увеличивается и прочность от  $250$  до  $280 \text{ кгс/см}^2$ . Процесс твердения в этот период еще может продолжаться благодаря изменениям минералогического состава. Эти изменения важны для окончательной механической прочности бетона, однако эта фаза характеризуется снижением темпа увеличения скорости ультразвука.

Исследование фаз твердения с оценкой каждой фазы, упомянутой раньше, показало, что имеется возможность снова вернуться ко всем видам портландцемента, включая цементы с неактивными или полуактивными добавками. Известно, что различные бетоны отличаются один от другого видом

цемента и при одном цементе водоцементным отношением или температурой и условиями твердения (см. рис. 2.31). Эти изменения влияют на продолжительность процессов, их начало и конец. Для иллюстрации на рис. 2.34 приведены скорости распространения ультразвука, измеренные в бетонах, приготовленных на разных цементах во время твердения, проходившего в III, IV и V стадиях. Из графика видно, что крайние точки, относящиеся к зоне связанной точечной системы, устанавливают границу между стадиями твердения III и IV, заключающуюся между 3,5 сутками (быстрохватывающийся портландцемент тонкого помола RIM) и 5 сутками — портландцемент марки 400 и P400 и портландцемент трассовый T25. Точно так же крайние точки,

Рис. 2.34. Твердение бетона, приготовленного на разных видах цемента

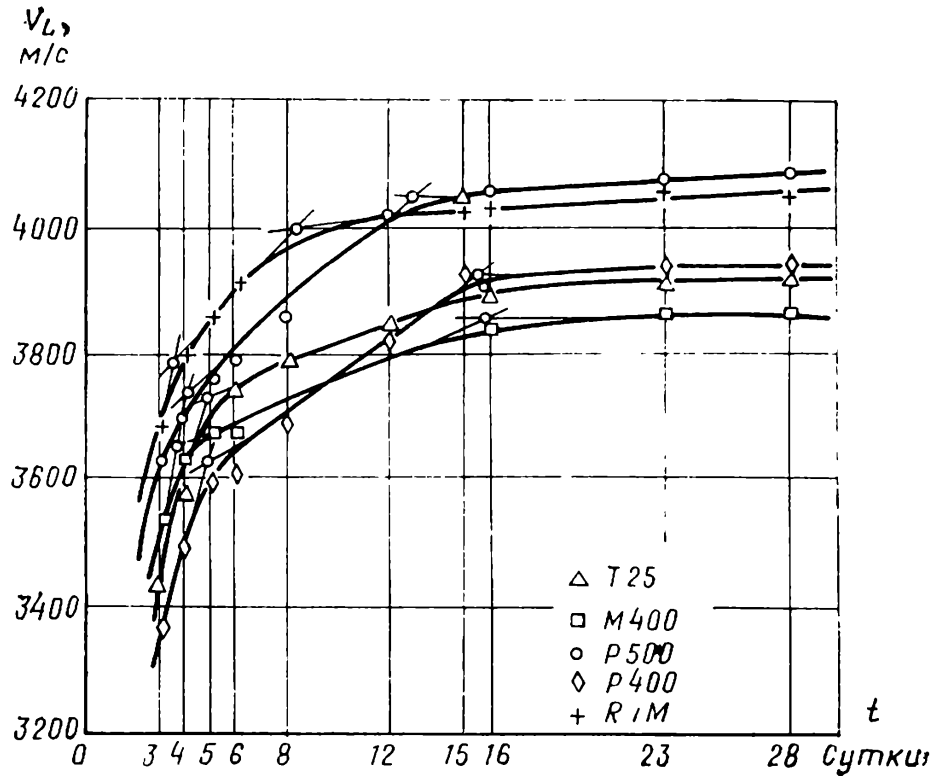
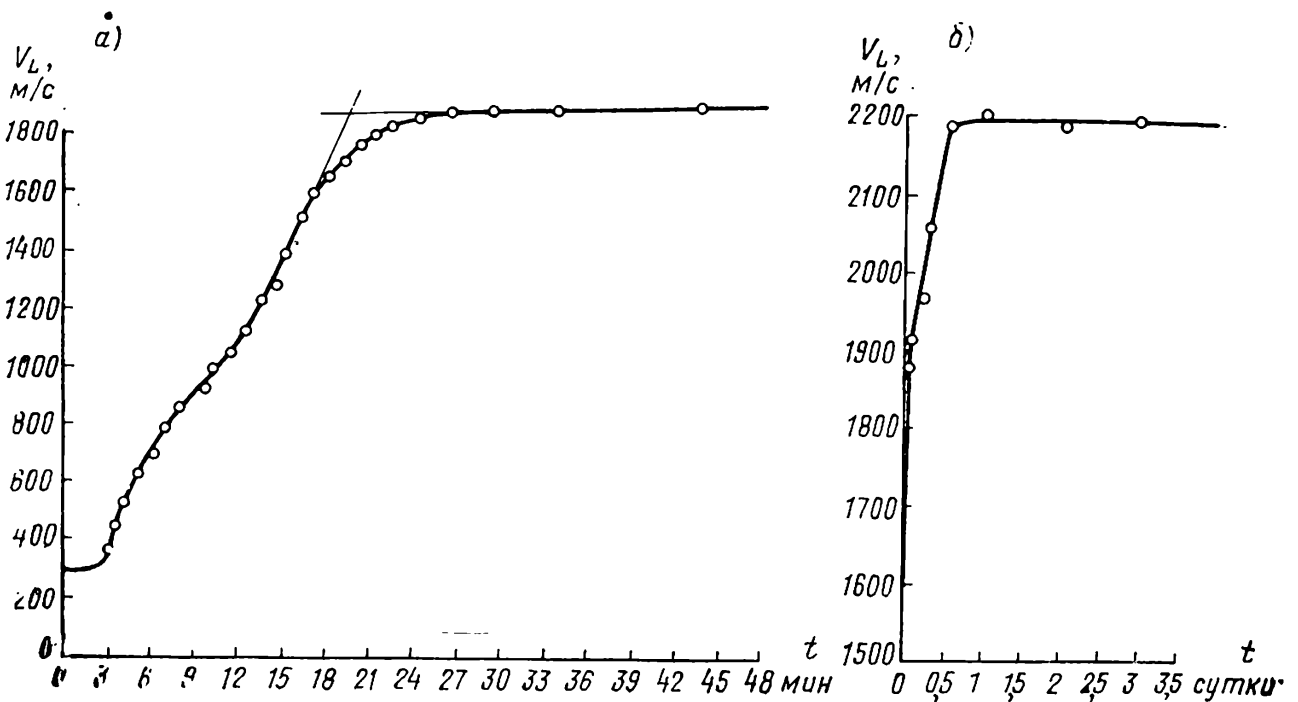


Рис. 2.35. Схватывание гипса  
а — в раннем возрасте; б — в позднем возрасте



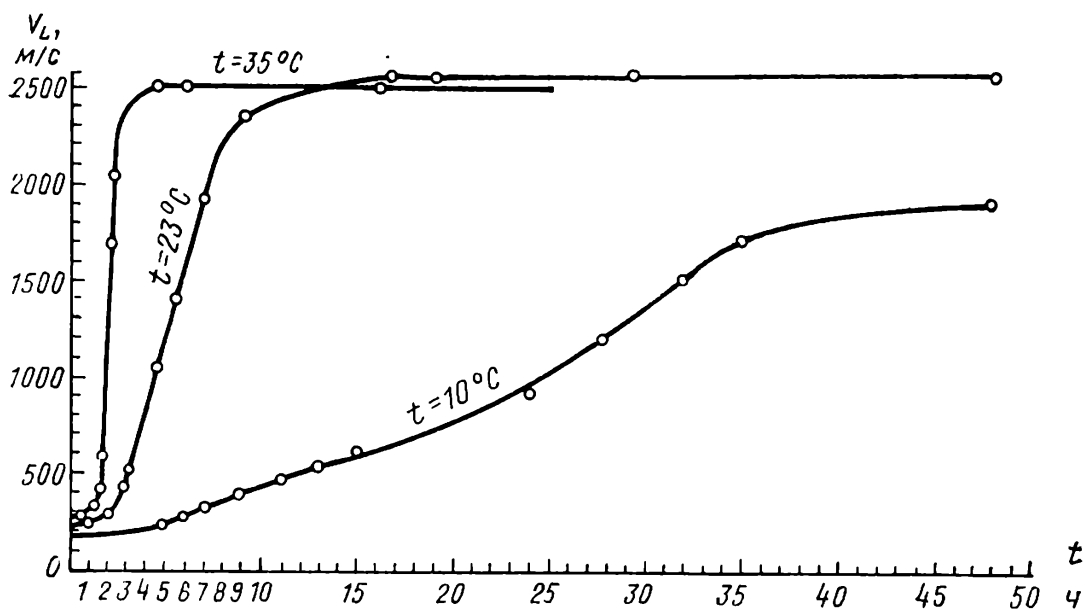


Рис. 2.36. Влияние температуры на твердение мастики из натрового растворимого стекла

относящиеся к зоне связанной точечной системы, устанавливают границу между стадиями твердения IV и V, между 8,5 сутками (цемент R1M) и 16 сутками (цемент P400).

Бетоны не являются единственной областью, в которой ультразвуковые методы можно с успехом применять в исследовании процессов твердения. Так, например, этот метод был принят для исследования процесса схватывания гипса ( $\text{CaSO}_4 - n\text{H}_2\text{O}$ ), в результате чего были получены определенные точки, характеризующие процесс схватывания, и зоны связанной точечной системы с ее положительной и отрицательной кривизной, в которой отмечаются начало и конец схватывания (около 3 мин и спустя 0,5 ч после замешивания соответственно). Также была установлена зона, в которой отмечен конец основного процесса и установлено схватывание гипса до истечения 12 ч с момента приготовления (рис. 2.35, а, б) [30].

Тот же метод был удачно применен и при исследовании твердения других видов вяжущих (негидравлических).

Например, были получены интересные результаты, относящиеся к процессу твердения мастики из растворимого стекла под влиянием температуры [31]. Испытания с помощью ультразвука позволили установить, что для температур в пределах между 35 и 10° С начало схватывания изменяется в пределах  $\frac{3}{4}$ —5 ч, а конец схватывания, соответствующий образованию кристаллической решетки, наблюдается по истечении 4 ч и может превышать 18 ч (рис. 2.36). Вообще следует отметить, что в случае постоянной температуры равной или меньшей, чем 10° С, мастика не достигнет полного затвердевания при любой продолжительности выдержки (см. рис. 2.36). Интервал оптимальных температур, по-видимому, находится между 15 и 25° С.

### 2.5.5. Определение динамических упругих постоянных бетона

Для определения упругих постоянных бетона без разрушения применяются резонансный метод. Однако часто для этого применяют резонансный и ультразвуковой импульсный методы совместно. Импульсный метод имеет преимущества, позволяющие испытывать элементы практически любой формы [47].

Комбинирование с резонансным методом используется для определения динамического коэффициента Пуассона  $\nu_d$  на основе приравнивания динамического модуля упругости, определяемого двумя этими методами. В случае такого приравнивания получаем уравнение

$$f(\nu_d) = \frac{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{1 - \nu_d} = \left( \frac{2lf_{L1}}{v_L} \right)^2, \quad (2.31)$$

где  $l$  — длина образца;  $f_{L1}$  — основная частота продольного резонанса;  $v_L$  — скорость распространения продольных волн ультразвука в массиве

Соотношение (2.31) позволяет определять  $\nu_d$  прямым вычислением или используя график на рис. 1.25. К применению этого метода для пористых влажных и дефектных элементов следует отнестись осторожно, так как для измерений необходимо использовать существенно разные частоты [32].

Лучше всего исследованы возможности определения динамического коэффициента Пуассона только на основе измерений скорости распространения ультразвука. С этой целью применяют выражения для определения скорости распространения различных видов волн, известных из физики, и соотношение модулей упругости:

$$G = \frac{E_d}{2(1 + \nu_d)}. \quad (2.32)$$

По этим условиям для комбинации «скорость продольных волн в массиве — скорость поперечных волн» получим выражение

$$\frac{v_T}{v_L} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu_d}{2(1 - \nu_d)}}. \quad (2.33)$$

Если запишем отношение  $\frac{v_T}{v_L} = a$  и используем выражение (2.33), то, решая относительно  $\nu_d$ , получим

$$\nu_d = \frac{1 - 2a^2}{2 - 2a^2}. \quad (2.34)$$

Для этой же цели можем применять также отношения: скорость в стержне — скорость в массиве ( $b$ ) (рис. 2.37); скорость поверхностной волны — скорость поперечной ( $c$ ); скорость поверхностной волны — скорость продольной волны в массиве ( $d$ ).

Определение коэффициента Пуассона производится по отношениям  $a$ ,  $b$ ,  $c$  или  $d$  с помощью графика на рис. 2.37. Основные

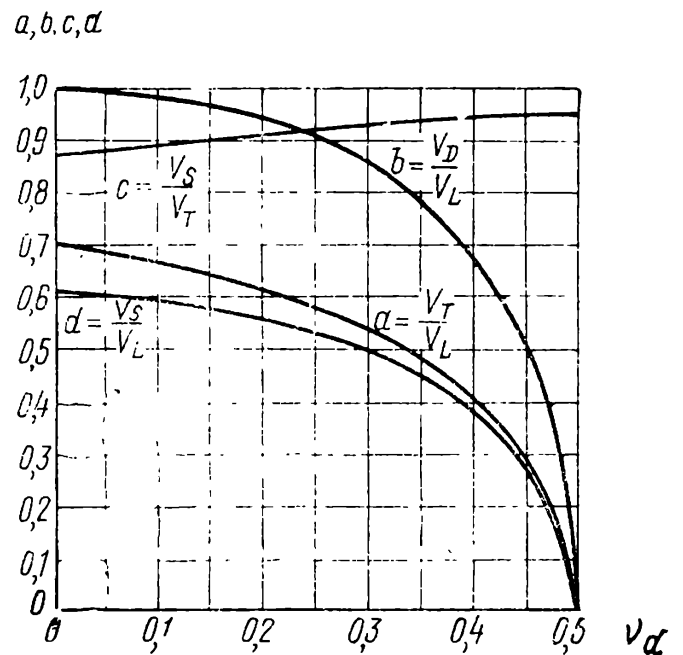


Рис. 2.37. Зависимость между отношением скоростей распространения и динамическим коэффициентом Пуассона

трудности метода состоят в определении других скоростей распространения, помимо продольных<sup>1</sup>. В табл. 2.4 и 2.5 приведены упругие постоянные для металлов и неметаллов.

Таблица 2.4. Упругие постоянные некоторых металлов и сплавов

Материалы	$\rho_d, \text{г/см}^3$	$v_L$	$v_D$	$v_T$	$E_d, \text{кгс/см}^2$	$G_d, \text{кгс/см}^2$	$\nu_d$
		м/с					
Алюминий . . . . .	2,7	6260	5080	3080	710 000	264 000	0,34
Бронза . . . . .	8,1	4430	3490	1120	1 007 000	372 000	0,34
Константан . . . . .	8,8	5240	4300	2640	1 660 000	625 000	0,33
Медь . . . . .	8,9	4660	3710	2260	1 250 000	464 000	0,35
Железо . . . . .	7,8	5850	5170	3230	2 100 000	820 000	0,28
Чугун . . . . .	7,7	4500	3850	2400	1 170 000	448 000	0,27
Никель . . . . .	8,8	5630	4790	2960	2 054 000	785 000	0,31
Сталь . . . . .	7,8	5850	5170	3230	2 040 000	855 000	0,28
Свинец . . . . .	11,4	2160	1200	700	160 000	58 000	0,44
Олово . . . . .	7,3	3320	2730	1670	554 000	208 000	0,33
Титан . . . . .	4,54	6100	5080	3120	1 193 000	450 000	0,32
Тунгстенил . . . . .	19,25	5180	4600	2870	4 160 000	1 620 000	0,29
Вольфрам . . . . .	19,1	5460	4310	2620	3 620 000	1 340 000	0,35
Цинк . . . . .	7,1	4170	3810	2410	1 050 000	420 000	0,25

Для определения динамического модуля упругости с помощью ультразвукового импульсного метода применяется основное уравнение

$$E_d = v_L^2 \frac{\gamma_a}{g} \cdot \frac{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{1 - \nu_d}, \quad (2.35)$$

в котором  $\nu_d$  принимается приближенно. Для бетонов, затвердевших на воздухе в возрасте выше 14 суток, принимают  $\nu_d = 0,25$ . Тогда соотношение (2.35) принимает вид приближенного выражения

$$E_d \approx 0,833 v_L^2 \frac{\gamma_a}{g}. \quad (2.36)$$

В различных работах рекомендуется также пользоваться следующей формулой для определения динамического модуля упругости бетона:

$$E_d = v_D^2 \frac{\gamma_a}{g}. \quad (2.37)$$

<sup>1</sup> Практические примеры определения упругих свойств бетонов по измеренным скоростям продольных и поперечных волн читатель может найти в брошюре: Почтовик Г. Я., Школьник И. Э. Ультразвуковой и вибрационный методы испытаний бетона. М., Изд. Московского инж.-строит. ин-та 1972 (примеч. науч. ред.).

Таблица 2.5. Упругие постоянные различных неметаллических материалов

Материалы	$\rho_a, \text{г/см}^3$	$\nu_L$	$\nu_D$	$\mu/c$		$E_{d'}$ кгс/см <sup>2</sup>	$G_{d'}$ кгс/см <sup>2</sup>	$\nu_d$
				$\nu_L$	$\nu_D$			
Андезит амфиболитовый	2,6—2,68	5700—5920	—	—	—	—	—	—
» пироксеновый	2,43	4200—4600	—	—	—	—	—	—
Ангидрит	2,93	5000	—	—	—	—	—	—
Сланец II	2,74	6500	—	—	3610	357 000	—	0,26
» I	2,74	5870	—	—	2800	214 000	—	0,35
Базальт	2,72	5930	—	—	3140	268 000	—	0,3
Барит	4,38	4020	—	—	—	—	—	0,26
Известняк меловой	1,6—1,8	2000—2800	—	—	1300—1600	—	—	0,24
» песчанистый	2,52	5250—5400	—	—	—	—	—	—
» метаморфический	2,66	6150	—	—	3260	736 000	—	0,3
Кварц	2,65	5730	—	—	—	—	—	—
Уголь в брикетах	1,4	3700	—	—	2000	—	—	0,29
Диабаз	2,79	4970	—	—	—	—	—	—
Гнейс	2,7	5300—5900	—	—	2800—3300	700 000	250 000	0,27
» выветренный	2,7	2200—2700	—	—	—	150 000	60 000	—
Гранит	2,69	3200—3600	—	—	—	—	—	—
Керамзит	0,56—0,67	2400—2800	—	—	—	—	—	—
Лимонит	2,45	1830	—	—	—	—	—	—
Лёсс	1,64—1,72	600—900	—	—	—	—	—	—
Гипс	2,26	4790	—	—	2370	—	—	0,34
Песчаник	2,6—2,62	3700—4900	—	—	—	—	—	—
Слюда	2,81	7760	—	—	3160	—	—	0,46
Слюдяной сланец	2,68—2,74	3200—4000	—	—	—	—	—	—
Сидерит	—	6000—6200	—	—	—	1 150 000	—	—
Фарфор	2,41	5340	—	4880	3120	586 000	238 000	0,2
Вода	1	1497	—	—	—	—	—	—
Стекло	2,51	5770	—	—	3430	—	—	0,21
Лед	—	3980	—	3280	1990	98 800	37 200	0,33
Глина	0,8	—	—	4050	—	133 000	—	—
Плексиглас	1,18	2670	—	—	1120	53 500	15 100	0,35
Каучук	0,9	1420	—	—	—	—	—	—
Воздух	0,001293	340	—	—	—	—	—	—

При этом следует убедиться в том, что условия достаточны для распространения волн со скоростью  $v_D$ ; другими словами, поперечные размеры элемента меньше, чем  $0,2 \lambda$  [33].

### 2.5.6. Дефектоскопия бетона с помощью ультразвукового импульсного метода

Дефектоскопия бетона — одно из основных направлений контроля качества бетона. Часто качество не соответствует требованиям благодаря местным дефектам, которые имеются на определенном участке одного и того же элемента. Во многих случаях на поверхности элемента обнаруживаются разного рода дефекты, которые могут быть очень серьезными. Кроме того, имеются дефекты внутренние, скрытые, которые нужно особо выделить. В этих случаях инженеру необходимо решить вопрос: в чем заключается опасность от присутствия такого дефекта? Разумеется, что ультразвуковой импульсный метод не единственный неразрушающий метод, который можно использовать для дефектоскопии бетона (за исключением слоя бетона большой толщины). Однако во всех случаях целесообразно начинать исследования методом, наиболее быстро осуществляемым и недорогим.

**2.5.6.1. Определение пустот.** Пустоты представляют собой наиболее опасный скрытый дефект бетона. Иногда под поверхностью бетона скрывается пустота, размеры которой могут снизить площадь поперечного сечения до 50%. Иногда такие пустоты образуются под сконцентрированной арматурой, если применяют нефракционированный заполнитель больших размеров, чем это предусмотрено проектом. Существует очевидное преимущество в использовании преобразователей с высокой собственной частотой, потому что угол  $\theta$ , которым ограничивается распространение импульса, будет наименьшим [см. формулу (2.2)].

Если определение пустот производится в одном элементе с двумя доступными сторонами, естественно, что все измерения нужно производить с обеих сторон. Эти измерения будут более результативными, если расстояние между излучателем и приемником будет минимальным. Если есть предположение, что дефект расположен ближе к одной стороне, тогда размещают излучатель на этой стороне. Когда дефект простирается в поперечном направлении, оправдывают себя измерения, проводимые теневым методом.

В большинстве случаев при определении пустот в бетоне имеется принятый сигнал, но он приходит позже, чем нормальный сигнал, и имеет небольшую амплитуду. Для пояснения ниже дается краткое изложение методики определения пустот. Перед проведением испытаний на поверхность элемента наносится первичная сетка, обозначенная  $A$ , с шагом точек, довольно редким, например до 30 см (рис. 2.38). Предполагаем, что в точке  $I$  был установлен отсчет времени, много бóльший, чем средний отсчет во всех других точках. Зона вокруг точки  $I$  вызывает подозрения в отношении возможного дефекта, и здесь наносят вторую сетку  $B$  с более частым шагом, например 10 см. Находят точку с наибольшим значением времени распространения [2] и принимают, что это ось пустоты. Принимается, что раковина (пустота) находится на одинаковом расстоянии от поверхностей, на которых установлены излучатель и приемник.

В этих условиях минимальный поперечный размер дефекта, взятый перпендикулярно направлению распространения, определяется из уравнения

$$d = D + L \sqrt{\left(\frac{t_d}{t_m}\right)^2 - 1}, \quad (2.38)$$

где  $D$  — диаметр преобразователя;  $L$  — расстояние между излучателем и приемником;  $t_d$  — максимальное время распространения в месте дефекта;  $t_m$  — среднее время распространения в однородной зоне, без дефектов.

Очевидно, что дефект, у которого диаметр  $d$  меньше или одинаковый с диаметром преобразователя  $D$ , не может быть установлен.

Метод был успешно применен при дефектоскопии конструкций многоэтажного промышленного комбината [34], где была обнаружена пустота в колонне под арматурой по направлению скоса консоли (рис. 2.39). Этот же метод был использован в силосе для зерна, в котором было запроектировано безбалочное перекрытие, где также обнаружили пустоты в месте пересечения наклонной арматуры капители с колонной, появившиеся в результате ошибки проектировщиков в сочетании с несортностью применяемого заполнителя (рис. 2.40).

**2.5.6.2. Определение глубины трещины.** Чтобы с помощью ультразвука определить глубину трещины или раскрывшегося шва на поверхности бетона, необходимо, чтобы трещина или шов были открытыми, без соединительного звукового «мостика». Также необходимо, чтобы в трещине или шве находился воздух, а не вода, так как последняя создает возможность нежелательной передачи ультразвуковой энергии внутри шва или трещины. При испытании влажного бетона зона, расположенная около трещины или шва, должна быть высушена. В принципе, существуют два пути для определения глубины трещины. К первому относится метод прозвучивания с одной поверхности, для которого требуется всего одна доступная сторона. Преобразователи размещаются по одну и другую сторону от трещины, на одинаковом расстоянии, приблизительно равном глубине трещины. Если преобразователи размещаются на расстоянии, примерно равном глубине, то ориентировочно импульс будет распространяться под углом  $45^\circ$  к нормали (рис. 2.41). Ультразвук огибает крайнюю точку  $A$  трещины, как это видно из рис. 2.41, и глубина трещины определяется выражением

$$h_f = \frac{L}{2} \sqrt{\left(\frac{t_f}{t_m}\right)^2 - 1}, \quad (2.39)$$

где  $L$  — расстояние между излучателем и приемником;  $t_f$  — время распространения в зоне трещины;  $t_m$  — среднее время распространения на расстоянии  $L$  в зоне бетона без трещины.

Поверхностный метод был успешно применен при определении глубины трещины, появившейся при изготовлении фундамента под турбогенератор (рис. 2.42).



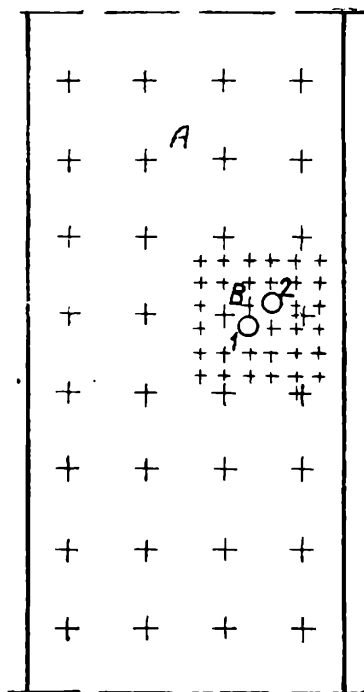


Рис. 2.38. Дефектоскопия колонны с пустотами

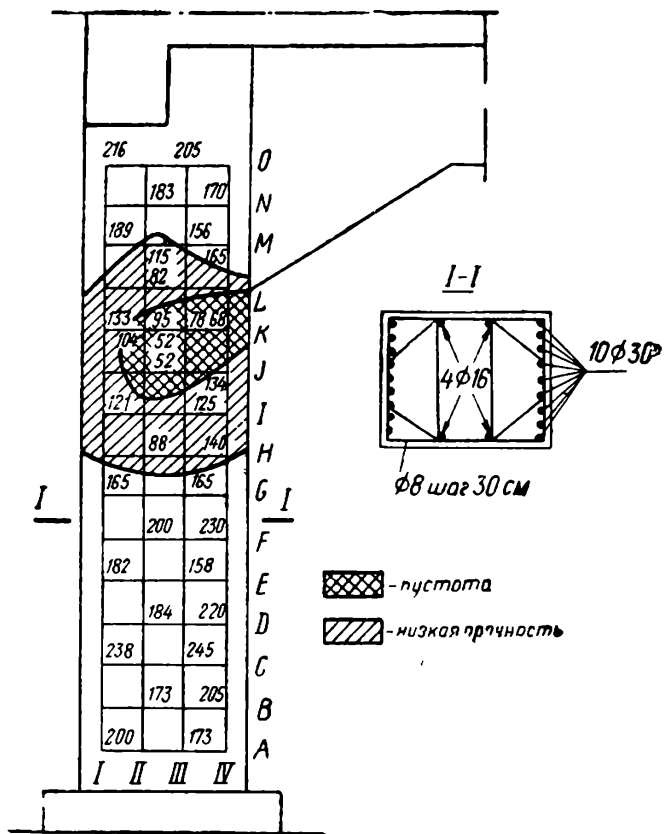


Рис. 2.39. Колонна с пустотами под вутром



Рис. 2.40. Колонна склада с пустотами, разрушенная во время испытания

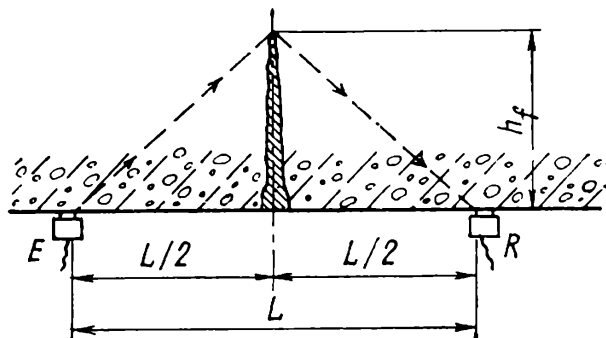


Рис. 2.41. Определение глубины трещины поверхностным методом

Рис. 2.42. Определение глубины трещины в фундаменте турбогенератора

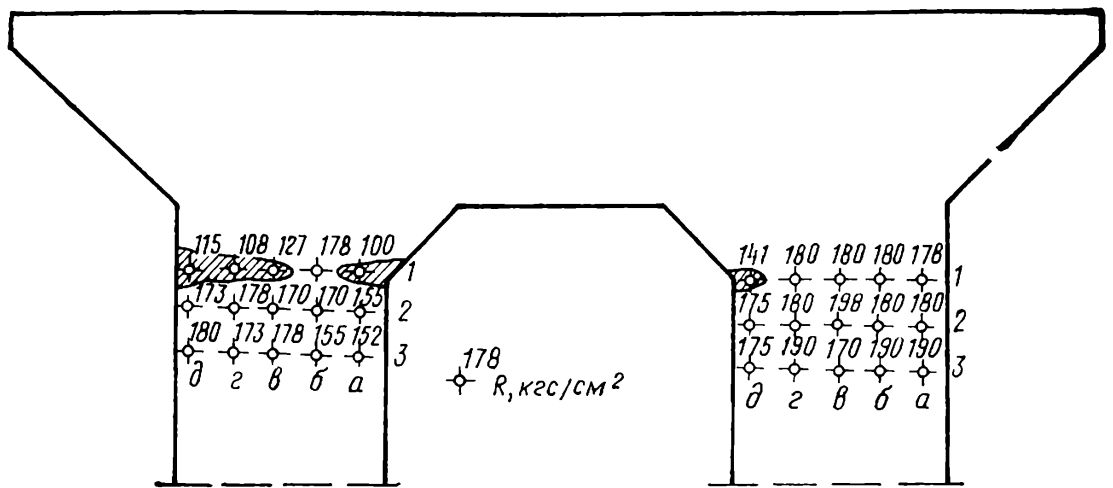
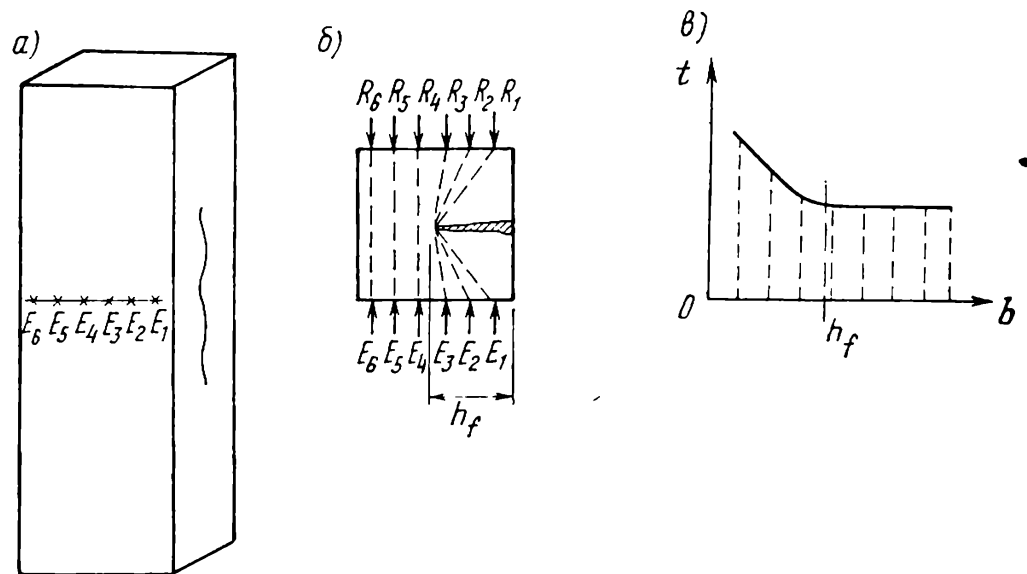


Рис. 2.43. Определение глубины трещины методом направленного прозвучивания



Другой метод основан на направленном прозвучивании. Этот метод можно применить к элементам с двумя доступными сторонами, которые расположены параллельно направлению трещины. Пример схемы испытания колонны изображен на рис. 2.43, а. Производится целый ряд измерений на одинаковом расстоянии, относительно небольшом (5—10 см) на той поверхности, на которой расположены видимые трещины (рис. 2.43, б). Полученные данные времени распространения, соответствующие каждому измерению, наносят на график, в котором по ординате наносится время, а по оси абсцисс — расстояние от лицевой стороны до верха трещины (рис. 2.43, в). Абсцисса является тогда шкалой глубины трещины.

Метод направленного прозвучивания был принят для определения глубины продольной трещины в железобетонной колонне здания теплоцентрали бетонирование которой производилось в зимнее время<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Интересен опыт выявления глубин трещин в массивных сооружениях гидротехнического строительства. См. Дмитриева Е. Г., Липник В. Г. Использование ультразвука для определения глубины распространения трещин в бетоне «Бетон и железобетон», 1969, № 7 (примеч. науч. ред.).

### 2.5.7. Определение толщины разрушенного слоя многослойной конструкции

Встречаются случаи, когда бетон в одном из элементов сборной или монолитной конструкции был разрушен под влиянием физических или химических агентов. В качестве физического агента могут быть пламя и замораживание, химического — кислоты, щелочи, соли. Конструкции могут иметь различные характеристики, такие, как: объем и удельная поверхность элемента, возраст, количество цемента, отношение  $V/C$ , принятое для приготовления смеси, степень уплотнения бетона, которая имеет значение для разрушенного слоя.

При рассмотрении вопросов, изложенных выше, предполагается, что разрушенный слой бетона имеет с неповрежденным четкую границу раздела. На самом деле наблюдения коррозии от типичного химического воздействия, проведенные радиографическим методом, не подтверждают этого и в действительности между слоями может оказаться целая переходная зона.

В этом случае существует два метода для определения условной толщины разрушенного слоя:

а) поверхностный метод, метод чисто неразрушающий, применяемый для элементов с одной доступной стороной или же для элементов, у которых разрушенный слой расположен на двух сторонах;

б) метод проникания (глубинный), метод комбинированный, частично разрушающий, применяется для элементов с двумя параллельными доступными сторонами, у которых может быть принята техника измерения сквозным прозвучиванием.

Поверхностный метод может быть использован в равной мере с излучателями электроакустическими или электромеханическими. Применение последнего типа преобразователей увеличивает преимущества метода и лучше концентрирует энергию вдоль линии испытания. Метод основан на схеме, изображенной на рис. 2.44. Вдоль прямой линии, намеченной на поверхности элемента произвольно, закрепляют излучатель и приемник, расположенные друг от друга на расстоянии примерно 10 см. Во время распространения продольной волны в разрушенной зоне, по прямой линии приблизительно в середине зоны, обнаруживается более быстрое прохождение ультразвука на участке излучатель — приемник. На расстоянии между излучателем и приемником, достаточно большом, существует еще один путь, физически более выгодный, чем геометрический, а именно тот, который дважды под углом проходит через слой разрушенного бетона и распространяется в неповрежденном бетоне вдоль ломаной линии  $EAB_iR_i$  (на рис. для  $i \geq 3$ ). Переходное состояние возникает в такой момент, в который время распространения ультразвука вдоль намеченной прямой становится одинаковым с временем распространения по ломаной линии:

$$\frac{l_0}{v_1} = \frac{2\sqrt{a^2 + X^2}}{v_1} + \frac{l_0 - 2X}{v_2}, \quad (2.40)$$

где  $l_0$  — расстояние между излучателем и приемником по прямой линии, на длине которой проходят две трассы с одинаковым временем распространения;  $a$  — толщина разрушенного слоя;  $X$  — проекция на горизонталь ломаных линий  $EA$  или  $B_iR_i$ ;  $v_1$  — скорость распространения в разрушенном бетоне;  $v_2$  — то же, в неразрушенном бетоне.

Для определения времени распространения  $t$  принимают за неизвестное проекцию  $X$  и отдельные отрезки ломаной линии  $EA$ , затем составляют алгебраическое выражение и рассматривают его решение при условии минимума:

$$t = \frac{2\sqrt{a^2 + X^2}}{v_1} + \frac{l_0 - 2X}{v_2} = \text{мин.} \quad (2.41)$$

Из условия (2.41) значение  $X$  определится как

$$X = \frac{v_1 a}{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}. \quad (2.42)$$

Подставляя значение (2.42) в (2.40) и записывая результат относительно  $a$ , получим

$$a = \frac{l_0}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}}. \quad (2.43)$$

Для определения величин  $l_0$ ,  $v_1$  и  $v_2$  можно воспользоваться рис. 2.45, на котором изображено время распространения, известное по последовательному расположению приемников  $R_1, R_2, \dots, R_i$  в зависимости от расстояний  $l_1, l_2, \dots, l_i$  от излучателя. На рисунке изображена характерная ломаная линия, первая часть которой представляет прямое распространение ультразвука, вторая — распространение по трассе  $EAB_iR_i$ .

Точка перелома соответствует расстоянию  $l_0$ , от которого начинается переход от прямого распространения к распространению вдоль ломаной трассы. Другие две расчетные величины — скорости распространения  $v_1$  и  $v_2$  — определяются из уравнения

$$\begin{aligned} v_1 &= \text{tg } \alpha = \frac{\Delta l_{1-2}}{\Delta t_{1-2}}; \\ v_2 &= \text{tg } \beta = \frac{\Delta l_{3-5}}{\Delta t_{3-5}}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

углы  $\alpha$  и  $\beta$  даны на рис. 2.45. Нужно разность длин  $\Delta l$  и времени  $\Delta t$  выразить соответственно в метрах и секундах, чтобы скорость получилась в м/с.

Метод можно применить и для измерения скорости распространения в недоступном слое двухслойной конструкции. Это имеет большое значение для дорожных бетонов, взлетных площадок и т. п. Необходимым условием техники измерения является требование, чтобы скорость во внутреннем слое была больше, чем в поверхностном:

$$v_2 > v_1. \quad (2.45)$$

Поскольку в упомянутых конструкциях эта разница может быть небольшой, при измерениях нужно стремиться к точному соблюдению расстояния между излучателем и приемником.

Метод проникания (глубинный), или комбинированный, может быть использован только с применением малогабаритных пьезопреобразователей. Он осуществляется с помощью введения в предварительно выбуренные в бетоне отверстия преобразователей диаметром меньше 3—5 см. Измерения ме-

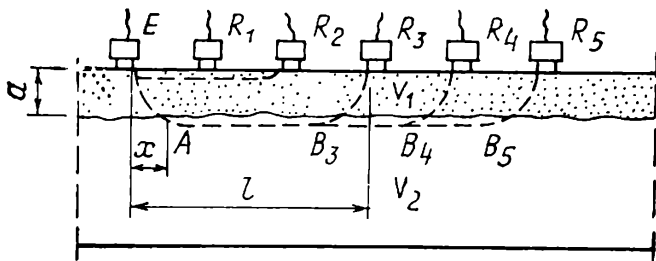


Рис. 2.44. Определение толщины поврежденного слоя поверхностным методом

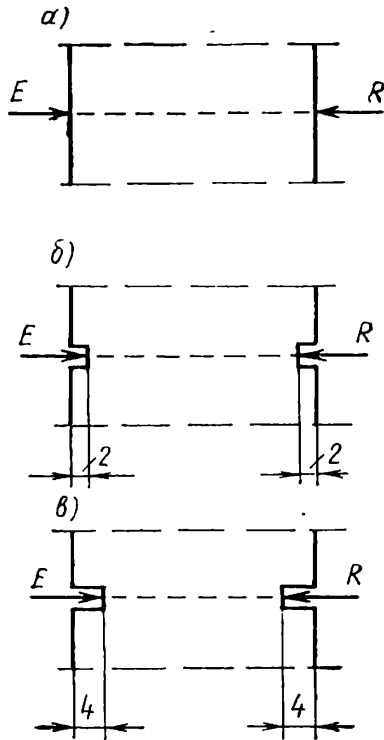


Рис. 2.46. Комбинированный метод для определения глубины поврежденного слоя

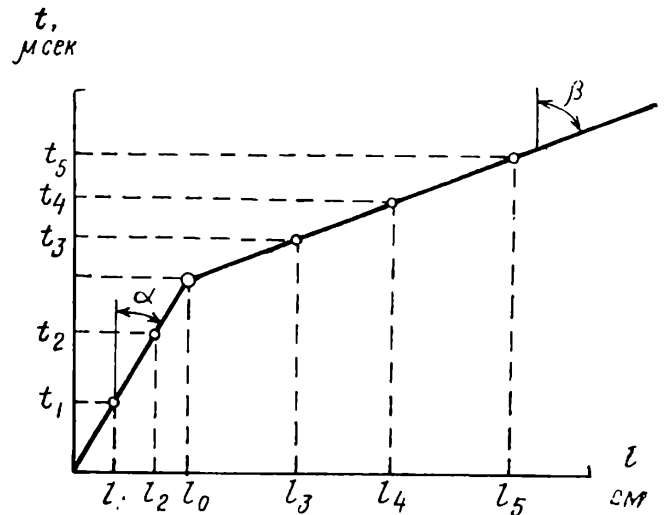


Рис. 2.45. Зависимость «время распространения — расстояние — излучатель — приемник» в разрушенном с поверхности бетоне

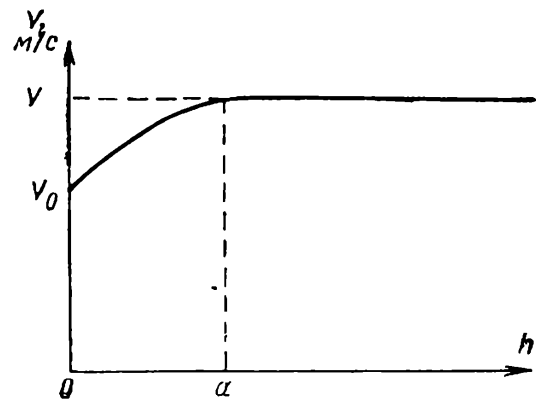


Рис. 2.47. Изменение скорости распространения при измерениях комбинированным методом

тодом проникания выполняют непосредственно с поверхности элемента, вводя преобразователи в отверстия различной глубины, например от 2 до 4 см (рис. 2.46, а, б, в). Вычисляют скорость, соответствующую каждому измерению, и результаты наносят на график, в зависимости от фактической глубины отверстия, приведенный на рис. 2.47. В поврежденном бетоне эта скорость от пониженного среднего значения порядка  $v_0 = 3000 \text{ м/с}$  начинает расти до величины, примерно равной  $v_{\text{пред}} = 4000 \text{ м/с}$ . Когда изменение скорости между двумя последовательными измерениями становится меньше 3% или измеренная скорость приближается к предельному значению  $v_{\text{пред}}$  (рис. 2.47), то считается, что толщина разрушенного слоя равна глубине отверстия.

Метод был применен на строительстве железобетонного многоэтажного жилого дома рамной конструкции. Контроль качества бетона производился для выявления последствий замораживания бетона непосредственно после изготовления.

## 2.5.8. Поведение бетона и раствора при агрессивном воздействии

Этой теме уделено большое внимание при описании резонансного метода. Однако в INCERC для исследования поведения различных составов растворов, бетона или замазок при воздействии кислот  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  независимо от их концентраций был успешно применен ультразвуковой метод. Был исследован также эффект от воздействия серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) и сульфатов и в особенности щелочная коррозия от растворов  $\text{NaOH}$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ \*.

Для получения надежных результатов с помощью ультразвукового импульсного метода в лабораторных условиях при исследовании коррозии строительных растворов и замазок следует принимать во внимание следующие требования:

а) собственная частота преобразователей должна быть повышенной (желательно выше 80 кГц);

б) отсчет на шкале времени должен быть максимум до 30—40 мкс с ценой деления не больше 0,1—0,2 мкс;

в) нужно использовать негидрофобную соединительную среду, инертную к раствору. Легко удаляемой средой, которая удовлетворяет этим требованиям, является пластилин. Он может применяться с большим успехом для влажных образцов;

г) образцы, используемые в испытаниях, должны иметь небольшие поперечные размеры, при условии согласования с максимальным диаметром заполнителя. Для растворов и замазок в INCERC использовали общепринятые образцы  $2 \times 2 \times 12$  см;

д) испытание должно проводиться в направлении меньших размеров образца. Такое направление обеспечивает значительное влияние более важного поверхностного слоя образца, который подвергается химическому воздействию; таким образом увеличивается чувствительность метода. Измерения вдоль образца имеют целью проверку материала в средней части, поскольку она еще не подвергалась химическому воздействию;

е) точки для испытания должны быть замаркированы, чтобы обеспечить последующие повторные измерения в тех же самых местах на поверхности образца.

Принципиальные преимущества ультразвукового метода при исследовании коррозии состоят в следующем: снижение количества образцов, необходимых для испытания, исключение влияния неоднородности материала на результаты испытаний, сокращение времени испытаний, минимальные манипуляции с образцом во время испытаний.

Типичные проблемы исследований по коррозии могут решаться ультразвуковым методом. Рассмотрим некоторые из них.

---

\* Использование ультразвуковых поверхностных и продольных волн позволило группе исследователей, работающих под руководством В. Б. Ратинова, не только исследовать подверженность бетона коррозии в различных агрессивных средах и ее развитие во времени, но определять одновременно толщину корродированного слоя. См. Р а т и н о в В. Б., Д з е н и с В. В., Н о в и к с Ю. А., Г р а б и с Я. Р. Ультразвуковой способ оценки влияния внешней среды на состояние поверхности строительных изделий. «Строительные материалы», 1971, № 2 (примеч. науч. ред.).

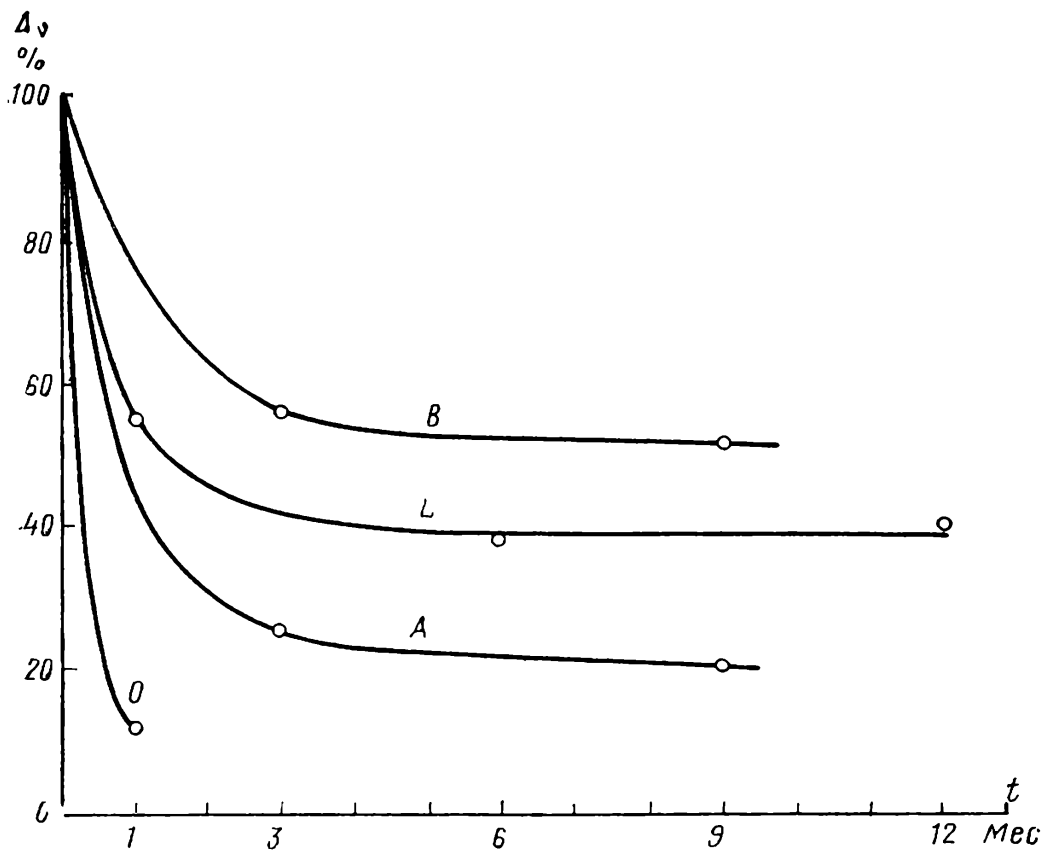


Рис. 2.48. Поведение растворов с добавкой латекса под воздействием 2% HCl

O — раствор без добавок; L — добавка Dow-Latex (бутадиен-стирол); A — латекс A5312 (полихлорпрен); B — латекс B3118 (бутадиен-стирол)

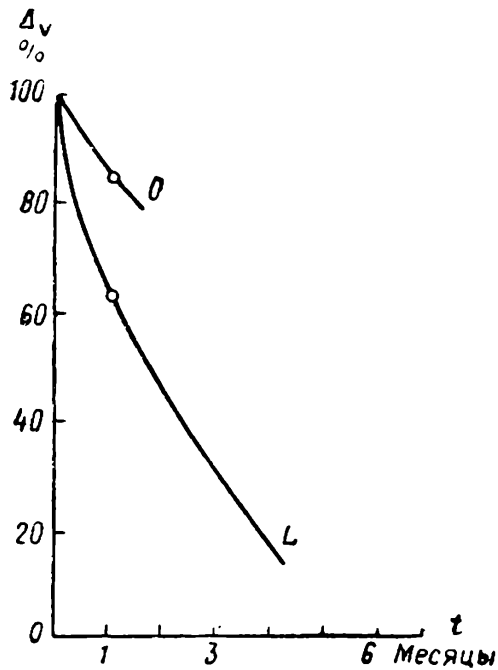


Рис. 2.49. Поведение растворов с добавками латекса в 2% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

O — раствор без добавки; L — добавка Dow-Latex

К первой проблеме относится исследование развития химического воздействия во времени, проведенное на различных материалах, для выбора растворов с наиболее эффективными защитными свойствами в зависимости от степени агрессивности среды. Для наглядного пояснения приведен график (рис. 2.48) поведения цементных растворов с добавками различных видов латекса, по сравнению с эталонными растворами [35] в среде 2% HCl. Рассмотрение кривых графика дает возможность заключить, что в данных условиях все растворы с добавками латекса ведут себя лучше, чем эталонные ра-

створы, и что среди исследованных растворов лучшими свойствами обладают растворы с добавками латекса типа В 3118 (бутадиен-стирол). Хотя такое положение существует для большинства агрессивных сред в промышленности неорганической химии, но имеются и такие среды, для которых растворы с добавками латекса оказались слабыми по сравнению с эталонными растворами. Такого рода примеры воздействия 2%  $H_2SO_4$  приведены на рис. 2.49.

Вторая проблема связана с исследованием поведения защитных материалов под действием агрессивных растворов различной концентрации с целью установления области допустимой концентрации этих растворов. Такие примеры приведены на рис. 2.50 для замазок на основе растворимого стекла с наполнителем IFA и различными добавками [36]. Из рис. 2.50 видно, что все испытанные замазки являются стойкими против агрессивных растворов с концентрацией свыше 20% и в особенности замазки с добавкой ультразвула 1,2% и что все замазки оказываются не стойкими против разбавленных растворов (1—10%). Из всех составов замазок наиболее стойкими являются замазки с добавками графита и более слабыми замазки без добавок, но с максимальным содержанием растворимого стекла.

В заключение, для установления эффективности применения ультразвукового импульсного метода по сравнению с другими неразрушающими методами были выполнены сопоставительные исследования с помощью этого метода, для установления степени чувствительности отобранных румынских цементов на воздействие  $CO_2$  в растворах. Сравнительные результаты исследований были основаны на измерениях скорости распространения ультразвука  $v$ , собственных частот изгибных колебаний  $f_F$ , собственных частот продольных колебаний  $f_L$ , потери массы образцами  $\Delta G$ , механической прочности по истечении 5 мес.  $R_i$  и  $R_c$ . В табл. 2.6 приведены для наглядного представления различные показатели в виде относительных потерь при соответствующих измерениях [37].

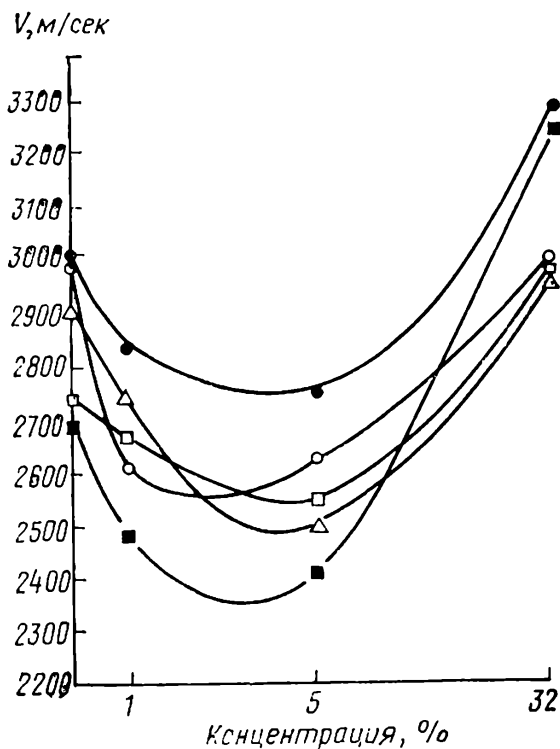


Рис. 2.50. Поведение замазки из натрового растворимого стекла в HCl

● — наполнитель IFA 73% +  $Na_2SiO_3$  типа С 27%;  
 ○ — наполнитель IFA 70% +  $Na_2SiO_3$  30%; □ — (наполнитель IFA+6% графита) 70% +  $Na_2SiO_3$  типа С 30%;  
 △ — (наполнитель IFA+6% талька) 70% +  $Na_2SiO_3$  типа С 30%; ■ — (наполнитель IFA+1,2% ультразила) 70% +  $Na_2SiO_3$  типа С 30%



Т а б л и ц а 2.6. Степень чувствительности цементов к воздействию CO<sub>2</sub>

Цементы	$\frac{\Delta f_F}{f_F}$	$\frac{\Delta v}{v} \%$	$\frac{\Delta f_L}{f_L} \%$	$\frac{\Delta G}{G} \%$	$\frac{\Delta R_i}{R_i} \%$	$\frac{\Delta R_c}{R_c} \%$
P400—Фиени . . . . .	—13,6	— 1,5	— 4,3	— 4,5	—13	—36
F300—Фиени . . . . .	—18,3	— 6,3	— 8	— 4,3	—23	—41
PZ2400—Фиени . . . . .	—18,9	— 7,8	—10	— 4,7	—28	—37
T25—Камарник . . . . .	—20	— 8,6	—5,8	— 3,9	—22	—33
C400—Фиени . . . . .	—20	— 9,3	—10	— 4,4	—28	—40
Алитик—Брашов . . . . .	—20	— 9,3	—10	— 6,1	—31	—38
KIM 300—Фиени . . . . .	—20,6	— 6,4	—9,1	— 6,1	—32	—50
M400—Меджидия . . . . .	—20,1	— 10	—11,2	— 7,2	—36	—42
G (зонде)—Чернавода . . . . .	—23,7	—11,8	—10,8	— 6,4	—31	—42
Феррари—Чернавода . . . . .	—26	—16,5	—11	—11,4	—35	—63

Из анализа заключающихся в таблице результатов можно отметить относительное совпадение между результатами проверки по различным методам, особенно между результатами резонансного метода изгибных колебаний и ультразвукового импульсного, и оценить эффективность того или иного метода.

Из указанного выше следует, что для оценки потерь прочности на растяжение при изгибе  $\Delta R_i$  потери скорости распространения ультразвука необходимо умножить на коэффициент, приблизительно равный 3, потери частоты изгибных колебаний — на коэффициент  $\sim 1,4$  и потери частоты продольных колебаний на коэффициент  $\sim 3$ .

### 2.5.9. Изменение структуры бетона в процессе нагружения

Для бетона является принципиальным требование соответствия структуры бетона величине сжимающей нагрузки<sup>1</sup>. По этой причине испытания структуры бетона с помощью неразрушающих методов проводят в зоне, в которой бетон работает на сжатие. Таким образом, возникла проблема исследования изменений в бетоне с помощью скорости распространения звуковой волны в процессе сжатия.

Для испытания ультразвуком имеется два направления в элементе, отличающиеся друг от друга: одно — вдоль нагружения, другое — поперек. Изменение скорости распространения в продольном направлении, в направлении нагружения не представляет большого интереса, во-первых, потому что небольшие усилия приводят к некоторому повышению плотности бетона и создают постепенное увеличение скорости распространения, и, во-вторых, потому что затрудняется получение практических результатов, поскольку, ес-

<sup>1</sup> Это утверждение авторов, видимо, следует понимать как соответствие несущей способности материала величине приложенного напряжения (примеч. науч. ред.).

ли направить прозвучивание параллельно оси элемента, преобразователи нужно установить там же, где передается нагрузка<sup>1</sup>.

Значительно больший интерес вызывают результаты испытаний, полученные при прозвучивании перпендикулярно приложенной силе.

Выполненные в INCERC испытания проведены на кубах со стороной 20 см с использованием прибора с постоянным прижимом преобразователей. Результаты представлены на рис. 2.51. Из диаграммы, полученной на бетонном образце примерно шестимесячного возраста, можно выделить четыре зоны. На участке кривой, представленном зоной нагружения *I*, скорость распространения ультразвука и затухание практически остаются постоянными. В этой зоне предполагается, что практически бетон не имеет микротрещин от нагрузки. Указанная зона при данных условиях простирается до границы, когда напряжения составляют 0,56—0,6 от предела прочности бетона. В этой зоне измерения скорости распространения ультразвука и его затухание для проверки качества бетона не требуют корректировки [39].

Следующий участок кривой соответствует зоне *II*, в которой скорость распространения и затухание изменяются, но незначительно, появляются и развиваются под нагрузкой микротрещины, пока изолированные, местные, в основном на поверхности заполнителя, которые, возможно, являются замкнутыми, но при работе элемента в условиях эксплуатации их следует считать опасными.

Эта зона простирается приблизительно до напряжений, составляющих около 0,8 от временного сопротивления.

Следующая зона *III* характеризуется резким снижением скорости распространения ультразвука и увеличением затухания. Такой зоне соответствует дальнейшее развитие микротрещин в части образца с минимальной прочностью по поверхности крупного заполнителя. Эта зона простирается до напряжений, составляющих около 0,95 от временного сопротивления.

Последняя зона *IV* является зоной разрушения, в ней происходит быстрое падение скорости распространения и увеличение затухания. Эта зона опасна для измерений вследствие быстрого развития процесса разрушения. В этой зоне предполагается, что система ранее образовавшихся микротрещин заполнила все поперечное сечение.

Интересно отметить, что характерные точки, которые отделяют зоны *I* и *II*, затем *II* и *III*, могут рассматриваться в связи со структурой и прочностью бетона. Первую точку можно было бы поставить в связь с усталост-

---

<sup>1</sup> Вопрос о способе установки преобразователей при исследовании микротрещинообразования в бетоне является дискуссионным. Использование объемных продольных волн с длиной волны, на много порядков большей, чем размер микротрещин, теоретически полностью исключает зависимость между направлением прозвучивания и преимущественным направлением микротрещин. Однако в эксперименте такая зависимость порой наблюдается из-за особенностей случайной локализации в объеме образца или элемента зон микротрещинообразования. Поскольку нужно стремиться к наиболее полному «охвату» прозвучиванием испытываемого объема, то расположение преобразователей с наибольшим удалением друг от друга по диагонали или на одной поверхности образца-призмы может оказаться результативнее, чем при поперечном расположении. См. Почтѳвик Г. Я., К р а с н о в с к и й Р. О. Применение ультразвука для исследования работы под нагрузкой железобетонных конструкций транспортных сооружений. — В сб.: Ультразвук в строительной технике. Под ред. Ю. А. Нилендера. М., Госстройиздат, 1962.

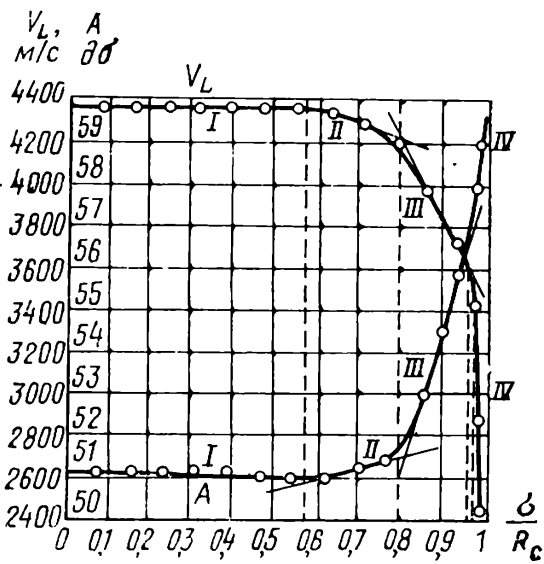


Рис. 2.51. Зоны микротрещин при испытаниях куба

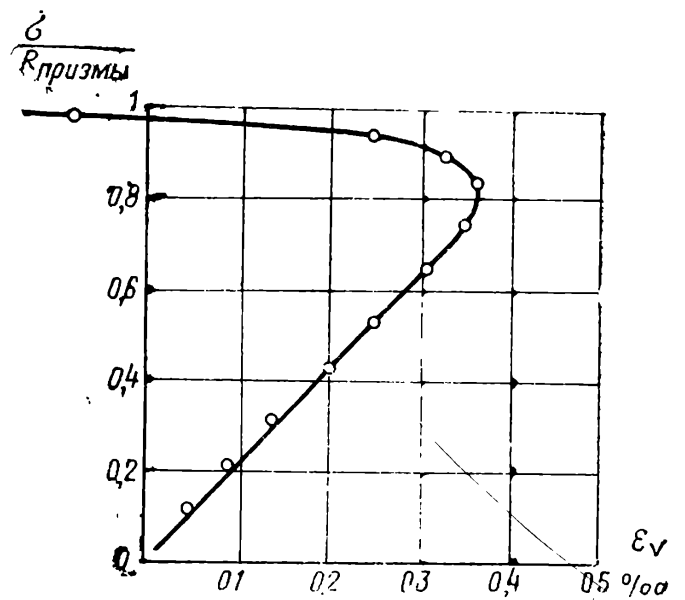


Рис. 2.52. Объемная деформация сжатия призмы

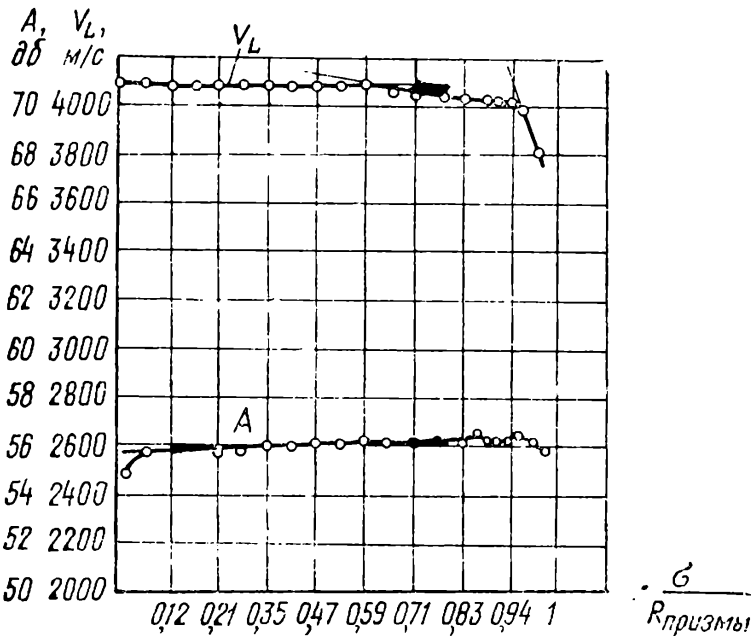


Рис. 2.53. Микротрещины в призме  $10 \times 10 \times 40$  см

ной прочностью. При повторном нагружении бетон воспринимает нагрузки в условиях распространения изолированных трещин, вплоть до образования системы трещин. Вторую характерную точку можно было бы поставить в связь с максимальным изменением объема (рис. 2.52), достигаемым в результате образования системы трещин, из-за которых на прочность бетона влияет длительная нагрузка<sup>1</sup>. Эта нагрузка может способствовать образованию и распространению микротрещин по всему поперечному сечению образца и привести призму к состоянию, не пригодному к дальнейшему испытанию.

Практически микротрещины распределяются равномерно по всему объему образца, и в тех местах, где нет в бетоне поперечной арматуры и сил тре-

<sup>1</sup> О. Я. Бергом на основании тензометрических измерений с определением дифференциального коэффициента поперечной деформации, а позднее на основании ультразвуковых измерений предложены понятия  $R_T^0$  — нижнее граничное напряжение микротрещинообразования и  $R_T^V$  — верхнее граничное напряжение микротрещинообразования. См. Берг О. Я. К вопросу о прочности и пластичности бетона. ДАН т. 70, № 4, 1950. Берг О. Я., Щербачков Е. Н., Писанко Г. Н. Высокопрочный бетон. М., Стройиздат, 1971 (примеч. науч. ред.).

ния, небольшие микротрещины объединяются между собой и образуют одну общую трещину, которая пересекает элемент и затем приводит к его разрушению. Если учесть, что эта трещина в плане наклонна или даже перпендикулярна направлению распространения импульса, то время распространения увеличивается вследствие обхода каждой трещины. Необходимо учесть, что волна должна обогнуть большое количество трещин, расположенных хаотически. Тогда наблюдается снижение скорости распространения ультразвука, причем в призме меньше (рис. 2.53), чем в кубе. По этой причине одна из характерных зон диаграммы (II), представляющая образование различных систем микротрещин, сменяется другой зоной (III), поскольку теперь образуется новая система крупных трещин, которая полностью завершает расчленение элемента и приводит его к разрушению (зона IV<sup>1</sup>).

Следующие образцы были испытаны с учетом влияния возраста и влажности бетона в связи с образованием микротрещин [39]. В первую очередь рассматривалась серия испытаний образцов, хранившихся на воздухе, испытанных в возрасте от 1 до 28 суток; результаты испытаний приведены на рис. 2.54. Сопоставление положения точек, которыми отмечается начало образования микротрещин под действием нагрузки, показало, что относительное напряжение, от которого начинается это явление (граница микротрещинообразования), повышается одновременно с увеличением возраста. Каким образом объясняется этот факт? После того как произошла усадка бетона, ее вредное влияние не сказывается на прочности сцепления цементного камня с заполнителем и относительно медленно развивающийся процесс твердения повышает уровень напряжений, при которых начинают образовываться микротрещины. Это явление основывается на увеличении сил трения и сил сцепления по поверхности заполнителя — раствора при одновременном высыхании и твердении бетона.

Рассматривалась также серия аналогичных испытаний образцов, хранившихся в воде (рис. 2.55). Сравнение данных показало, что граница образования микротрещин снизилась, поскольку сцепление и трение увеличиваются в этих условиях медленнее<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Кривые тех типов, что приведены на рис. 2.51 и 2.53, были получены с повышением точности измерения времени распространения ультразвука в начале 60-х годов в Московском автодорожном институте, но отличались участком первоначального возрастания скорости до напряжений  $R_T^0$ . См. Почтовик Г. Я. Применение ультразвука для исследования структурно-механических изменений в бетоне и естественных каменных материалах. — В сб.: «Промышленность строительных материалов Москвы». М., № 6, 1961.

Позднее эти кривые были названы «диаграммами состояния бетона», поскольку наиболее эффективно отражали превращения структуры и развитие микроразрушений в сжимаемом бетоне. См. Берг О. Я., Писанко Г. Н., Хромец Ю. Н. Исследование физического процесса разрушения бетона под действием статической и многократно повторяющейся нагрузки. — В сб. трудов ЦНИИС, вып. 60, «Транспорт», 1966 (примеч. науч. ред.).

<sup>2</sup> Аналогичные опыты проведены в НИИСК Госстроя СССР по более широкой программе. В этих опытах влажное хранение и изоляция образцов с целью удержания влаги также привели к снижению граничного напряжения микротрещинообразования. См. Иванов Ю. А. Экспериментальные исследования прочности и деформативности бетонов. — В сб. НИИЖБ «Структура, прочность и деформация бетона». Под ред. С. В. Александровского и А. Е. Десова. М., 1972 (примеч. науч. ред.).

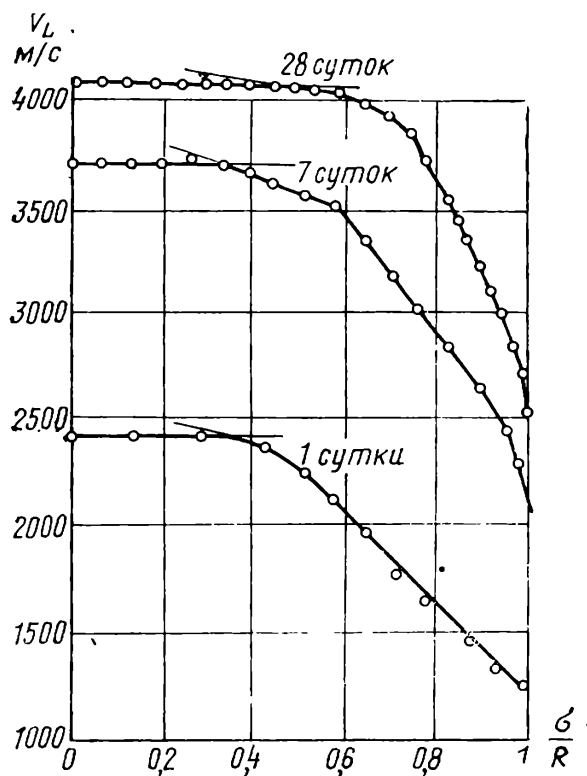


Рис. 2.54. Влияние возраста на образование микротрещин в бетоне, хранившемся на воздухе

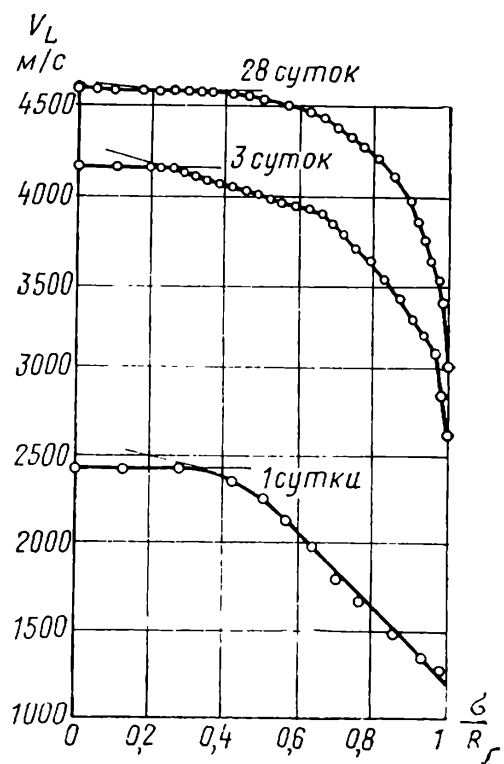


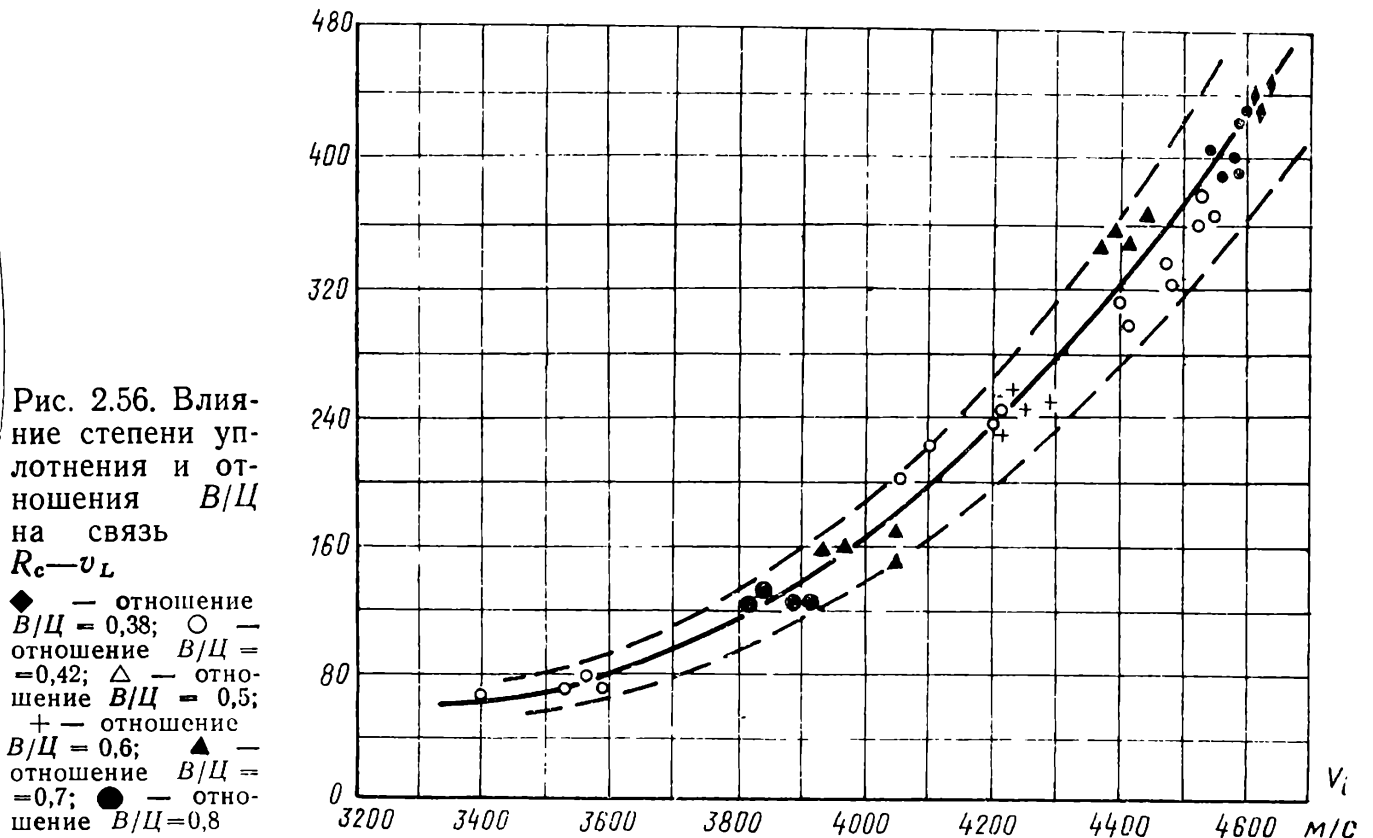
Рис. 2.55. Влияние возраста на образование микротрещин в бетоне, хранившемся в воде

Резюмируя изложенное, следует отметить, что с увеличением возраста бетона происходит повышение его прочности и граница образования микротрещин под воздействием нагрузки повышается для бетона, хранившегося на воздухе, и снижается для бетона, хранившегося в воде. С увеличением влажности бетона при одинаковом возрасте происходит снижение прочности и границы образования микротрещин за счет снижения трения по поверхности заполнителя — раствора.

## 2.5.10. Связь между скоростью ультразвука и прочностью бетона при сжатии

### 2.5.10.1. Применение тарировочной кривой.

Связь между скоростью распространения ультразвука и прочностью бетона при сжатии составляет одну из наиболее интересных проблем для инженера-строителя. Было проведено много дискуссий по основам этой проблемы с тем, чтобы ограничить в общих чертах ее пределы. Теперь практически единодушно подтверждается, что измерения скорости распространения просты и даже без сочетания с другими способами испытаний не могут привести к ошибкам, превышающим  $\pm 30-40\%$  в оценке прочности бетона [40]. Разумеется, не всякое испытание приводит к ошибкам такого порядка, которые относятся к неблагоприятным условиям испытаний при отсутствии данных о составе бетона. Теперь единодушно принято, что, если на месте испытаний получить хотя бы приблизительно так называемую тарировочную кривую «скорость — проч-

$R, \text{кгс/см}^2$ 

ность бетона», существуют все шансы оценить прочность бетона с допустимой точностью.

Тарировочная кривая получается при параллельных неразрушающих и разрушающих испытаниях на специально изготовленных образцах или же на готовых образцах, которые хранились на складе. Для получения точной тарировочной кривой минимально необходимо 15 образцов; их разбивают на пять серий по три образца в каждой. Две серии могут отличаться от других степенью уплотнения или количеством воды, т. е. водоцементным отношением применяемого бетона<sup>1</sup>. Основным элементом определения прочности бетона ультразвуком является: установка образца, за которой следует измерение скорости распространения, затем следует определение прочности, зависящей от пористости бетона. Основные факторы, влияющие на пористость бетона: уплотнение и количество воды в бетонной смеси. Эти два фактора эквивалентны. Тарировочная кривая приведена на рис. 2.56.

Для оценки качества бетона, степени уплотнения или дозировки воды для приготовления бетона следует измерять скорость распространения ультразвука. Поскольку большинство определений качества бетона проводилось на строительных объектах и существовали трудности при сопоставлении данных, была найдена основная причина отклонений — нерегулярно меняющаяся дозировка воды в смеси. Распространено мнение, что ультразвуковые методы эффективны, главным образом там, где нужно определить

<sup>1</sup> Построение тарировочной кривой «скорость — прочность» регламентируется ГОСТ 17624—72 «Бетоны тяжелые и легкие. Ультразвуковой метод определения прочности». Рекомендации ГОСТа отличаются от предложений авторов (примеч. науч. ред.).

однородность качества бетона, уложенного в дело, и не пригодны для точной оценки абсолютных значений прочности. Однако это вопрос правильного выбора тарировочной кривой.

Хорошая тарировочная кривая может быть получена для бетона, приготовленного при минимальном отношении  $V/C$  и времени вибрирования от 0 до 60 с; бетон может быть также приготовлен с отношением  $V/C$  в интервале 0,4—0,8; могут быть использованы другие параметры. Стандартная тарировочная кривая покрывает область скорости распространения от 3200 до 4200 м/с. В этом случае условия хранения или ускоренного твердения таких образцов должны быть аналогичными бетону, уложенному в дело и испытанному приблизительно в таком же возрасте.

В некоторых случаях существует возможность построения тарировочной кривой для различных типов сборных элементов, если на строительстве известен более или менее точно состав применяемого бетона и имеется только ограниченное количество (обычно 3) образцов, приготовленных в тех же условиях, что и бетон, уложенный в дело, или имеется возможность извлечения определенного количества образцов путем выбуривания керна из существующих конструкций. Учитывая изложенное выше, румынскими нормами устанавливаются правила, которые позволяют уверенно действовать в таких случаях [40].

**2.5.10.2. Аналитическая запись корреляционной зависимости «скорость ультразвука — прочность бетона».** Необходимо теоретически производить преобразование скорости распространения в прочность при сжатии, а для этого следует составить приближенного вида математические уравнения для вычисления соотношения между двумя характеристиками. В качестве первоначального условия для установления этого соотношения было констатировано, что прочность при изменении плотности и отношения  $V/C$  является функцией скорости распространения. Теперь установлено, что это соотношение нелинейное и что небольшому увеличению скорости соответствует большое увеличение прочности. В настоящее время пользуются следующими видами уравнений:

$$R_c = av^2 + bv + C; \quad (2.46)$$

уравнение (2.46) применяется главным образом в Польше;

$$R_c = av^b \quad (R_c = av^4); \quad (2.47)$$

уравнение (2.47) применяется в Чехословакии и ГДР;

$$R_c = ae^{bv} \quad (R_c = ae^{1,1v}); \quad (2.48)$$

уравнение (2.48) применяется в Голландии и Румынии;

$$R_c = \frac{E_d^2}{K^2}; \quad (2.49)$$

уравнение (2.49) применяется во Франции<sup>1</sup>. В этих соотношениях  $a, b, c, K$  — постоянные. Из приведенных соотношений в первую очередь эквивалентны

<sup>1</sup> Уравнения (2.46)—(2.49) являются частным видом более общей зависимости, из которой они могут быть легко получены. См. Вайншток И. С., Мизрохи Ю. Н., Школьник И. Э., Котляр С. Р. Оценка погрешностей в определении прочности бетона ультразвуковым методом. — В сб.: Экспериментальные исследования инженерных сооружений. Доклады и сообщения на II симпозиуме в Ленинграде. Вып. 6. М., Центр. НИИ по строительству и архитектуре, 1969 (примеч. науч. ред.).

между собой (2.47) и (2.49). Для проверки этого динамический модуль упругости  $E_d$ , приведенный в уравнении (2.35), подставляем в уравнение (2.49), тогда получим

$$R_c = \left( \frac{\gamma_a}{gK} \right)^2 \frac{(1 + v_d)^2 (1 - 2v_d)^2}{(1 - v_d)^2} v^4; \quad (2.50)$$

эквивалентны между собой также соотношения (2.59) и (2.62), если запишем:

$$a = \left( \frac{\gamma_a}{gK} \right)^2 f^2 (v_d) \quad (2.51)$$

и

$$b = 4. \quad (2.52)$$

В настоящее время стремятся к тому, чтобы соотношение между скоростью и прочностью, выраженное через динамический модуль упругости, постепенно исключить из пользования по следующим причинам:

предполагаются известными динамический коэффициент Пуассона и объемная масса;

соотношение показывает, что прочность бетона при сжатии при той же самой скорости распространения тем больше, чем больше объемная масса, что противоречит экспериментальным данным, полученным для легкого бетона;

не решена проблема эмпирической постоянной соотношения, поскольку введенная постоянная  $K$  изменяется в зависимости от состава бетона в широких пределах главным образом потому, что возведена в квадрат.

Возвращаясь к соотношениям (2.46)—(2.48), необходимо подчеркнуть, что большое количество эмпирических постоянных в соотношении (2.46) не упрощает решение проблемы. Поэтому это соотношение применяют незначительное количество стран. Существует также мнение, что соотношение (2.46) изменяется слишком медленно со скоростью  $v$ , что неправильно отражает соотношение скорости и прочности для высоких прочностей бетона.

Соотношения, которые в настоящее время наиболее часто применяют, — (2.47) и (2.48). Подходящий выбор постоянных  $a$  и  $b$  на основании экспериментальных данных показал, что между этими двумя соотношениями разница очень небольшая. Для примера на рис. 2.57 приведены графики зависимостей (2.47) и (2.48) при значениях постоянной  $b = 1,1$  и постоянной  $a$ , полученной из условия

$$v = 3200 \text{ м/с}; \quad R_c = 80 \text{ кгс/см}^2. \quad (2.53)$$

Из графика видно, что разница для большинства показаний скорости распространения невелика и существенно заметна только для скоростей, превышающих 4200 м/с. В Румынии предпочтение отдается соотношению с показательной степенью, потому что по этой зависимости прочность на единицу скорости изменяется сильнее, чем по многочлену, и опыт подтверждает такое положение.

Следует заметить, что для точного преобразования скорости в прочность пока не существует математического выражения, которое было бы в состоянии дать решение, исключаящее возможность получения ошибок свыше 5—7%, того предела точности, которым определяют постоянные  $a$  и  $b$  для выбора кривой, учитывающей состав, возраст и условия хранения бетона до



испытания. Детальный анализ влияния этих факторов приводится в следующем разделе.

**2.5.10.3. Влияние вида цемента.** Основной фактор в бетонной смеси, который влияет на соотношение «скорость — прочность», — это вид применяемого цемента. С целью уточнения этого влияния в INCERC были выполнены исследования бетона с различными видами цемента, применяемых в Румынии.

Результаты исследований, проведенных на 28-е сутки, даны на рис. 2.58. График показывает, что имеется довольно широкая категория цемента, которая группируется вокруг портландцемента P400 и цемента, называемых производными, с небольшим количеством активных добавок (меньше 25%). В эту категорию входят цементы P400, PZ400, C400, T25, M400.

Все бетоны, приготовленные на этих цементах, могут быть приблизительно объединены одной кривой. Бетонные смеси на быстротсхватывающемся цементе RIM характеризуются кривой «скорость — прочность», отличающейся от других, расположенных таким образом, что при одинаковой скорости распространения соответствующая ей прочность больше, чем для бетона на обыкновенном цементе.

Бетонные смеси, приготовленные на цементах P500 или BSS, занимают промежуточное положение между бетонными смесями на обыкновенном портландцементе и бетонными смесями на цементе RIM.

$R, \text{кгс/см}^2$

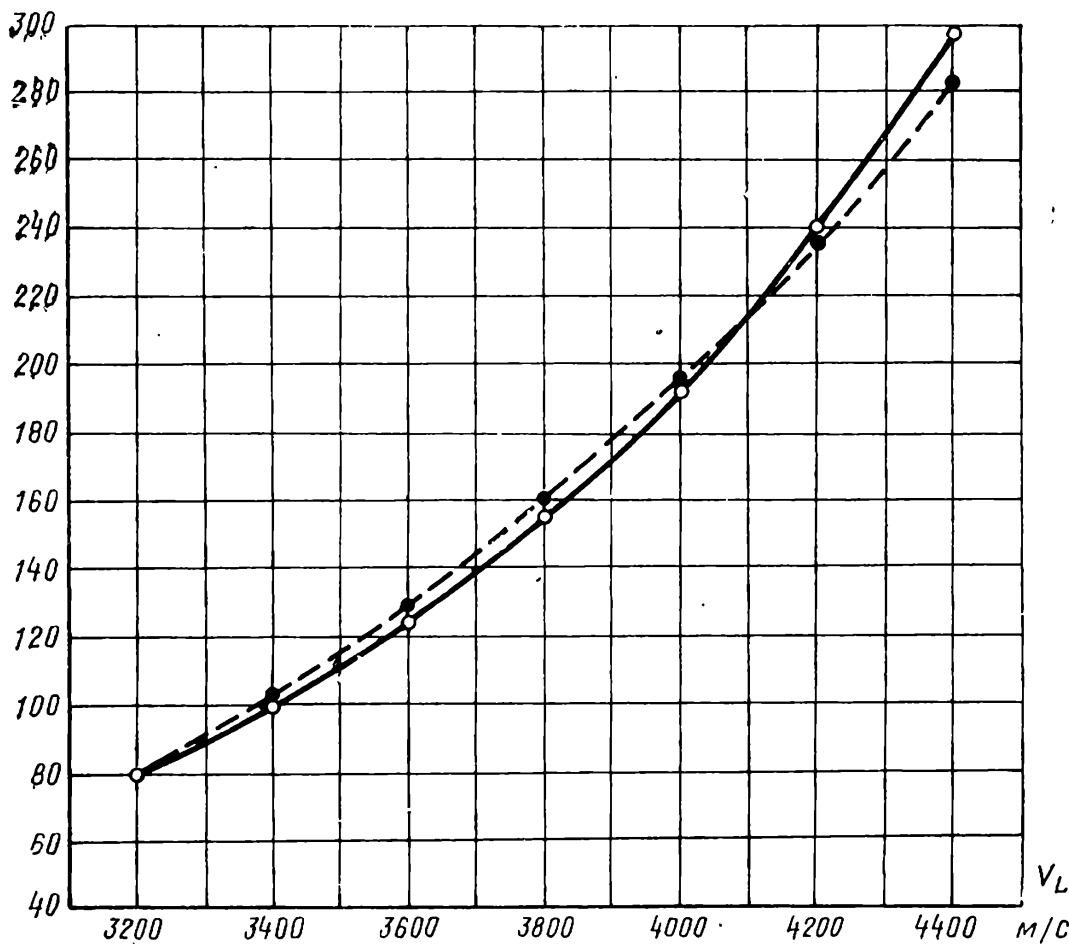


Рис. 2.57. Зависимость  $R_c - v_L$  в виде степенной функции и экспоненты  
 ● — кривая  $R_c = av^4$ ; ○ — кривая  $R_c = ae^{1.1v}$

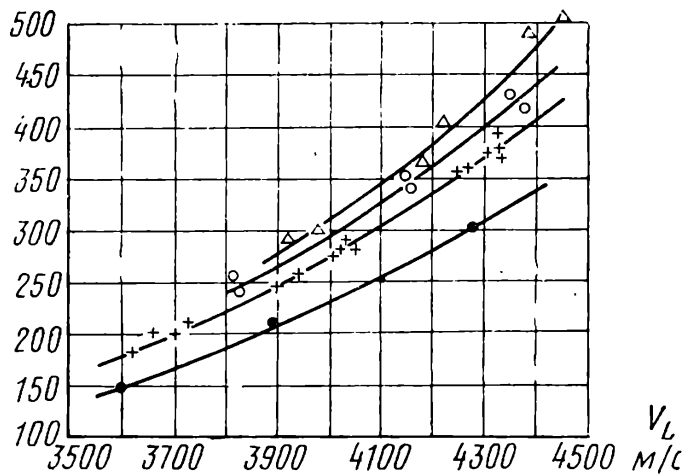
$R_c, \text{кгс/см}^2$ 

Рис. 2.58. Влияние видов цемента на соотношение  $R_c—v_L$   
 $\Delta$  — P500;  $\circ$  — BSS; + — PZ400, M400 P400;  $\bullet$  — F

Таблица 2.7. Коэффициенты влияния вида цемента

Вид цемента	Коэффициент влияния $C_c$
RIM	1,14
P500, BSS	1,07
P400, PZ400, M400, T25	1
F300	0,85

По другую сторону располагаются бетонные смеси, приготовленные на цементах с низкими показателями, с большим количеством добавок, например цемент F300, содержащий 40% шлака. Для таких бетонов для скорости распространения такой же, как и для бетонов на обыкновенном портландцементе, соответствующая прочность при сжатии меньше.

Если сравнить бетон на обыкновенном портландцементе с бетоном на другом виде цемента, то механическая прочность, соответствующая скорости распространения ультразвука в этом бетоне при переводе ее в прочность бетона на портландцементе, будет определяться коэффициентами, приведенными в табл. 2.7.

Эти коэффициенты названы коэффициентами влияния, поскольку отражают влияние цемента, применяемого для приготовления бетона на зависимость измеренной скорости распространения ультразвука и прочности бетона при сжатии.

Основная закономерность, на основании которой осуществляется влияние свойств цемента на зависимость «скорость — прочность», по-видимому, может быть следующая: чем больше процентное содержание трехкальциевого силиката ( $C_3S$ ) и выше тонкость помола цемента (удельная поверхность), тем прочность, соответствующая определенной величине скорости распространения, выше. Данные, приведенные в табл. 2.7, подтверждают это основное правило.

**2.5.10.4. Влияние количества цемента.** Другим важным фактором, относящимся к бетонной смеси, который влияет на соотношение «скорость — прочность», является расход цемента на  $1 \text{ м}^3$  бетона, т. е. его дозировка. В отношении признания решающего влияния дозировки цемента говорит то обстоятельство, что прочность бетона определяется в основном прочностью раствора, расположенного между крупным заполнителем, а скорость распространения ультразвука в бетоне зависит в большей степени от скорости распространения в заполнителе. Из этого возникает положение, которое ха-

рактируется, с одной стороны, тем, что заполнитель занимает бóльшую часть объема бетона (в общем, около 80% и только крупный заполнитель около 50—60%); с другой стороны, скорость распространения в цементном камне, уже полностью схватившемся, много меньше, чем в крупном заполнителе, и импульсу приходится отыскивать наиболее короткую траекторию в растворе или цементном камне. Таким образом траектория распространения проходит в основном по крупному заполнителю, чем снижается возможность оценки многих важных качеств раствора и цементного камня (рис. 2.59). Тем не менее путь ультразвука только сквозь крупный заполнитель в бетоне не возможен, и распространение ультразвука через слои раствора, заключенные между крупными зернами заполнителя, оказывает значительное влияние на скорость распространения. Растворная составляющая бетона влияет на механическую прочность.

По данным, приведенным на рис. 2.59, видно, что с увеличением количества цемента в бетоне скорость распространения ультразвука увеличивается медленнее, чем механическая прочность бетона. Это подтверждается также данными, приведенными на рис. 2.60. По мере того как увеличивается дозировка цемента в бетоне, прочность при сжатии, соответствующая скорости распространения ультразвука, повышается. Когда увеличивают дозировку цемента до заданной предельной величины, например 400—450 кг/м<sup>3</sup>, скорость распространения начинает снижаться, несмотря на то что прочность продолжает увеличиваться. Применение ультразвука для определения прочности бетона при дозировке цемента, близкой к предельной величине, становится рискованным. Определение прочности бетона ультразвуковым методом для высоких марок бетона, начиная от В400 и выше, не рекомендуется.

Если взять отношение прочности, соответствующей данной скорости распространения для бетона, приготовленного с дозировкой 300 кг/м<sup>3</sup> цемента, к бетону, приготовленному с другими различными дозировками цемента, то получаемые результаты изменения скорости могут быть учтены коэффициентами влияния дозировки, которые приведены в табл. 2.8.

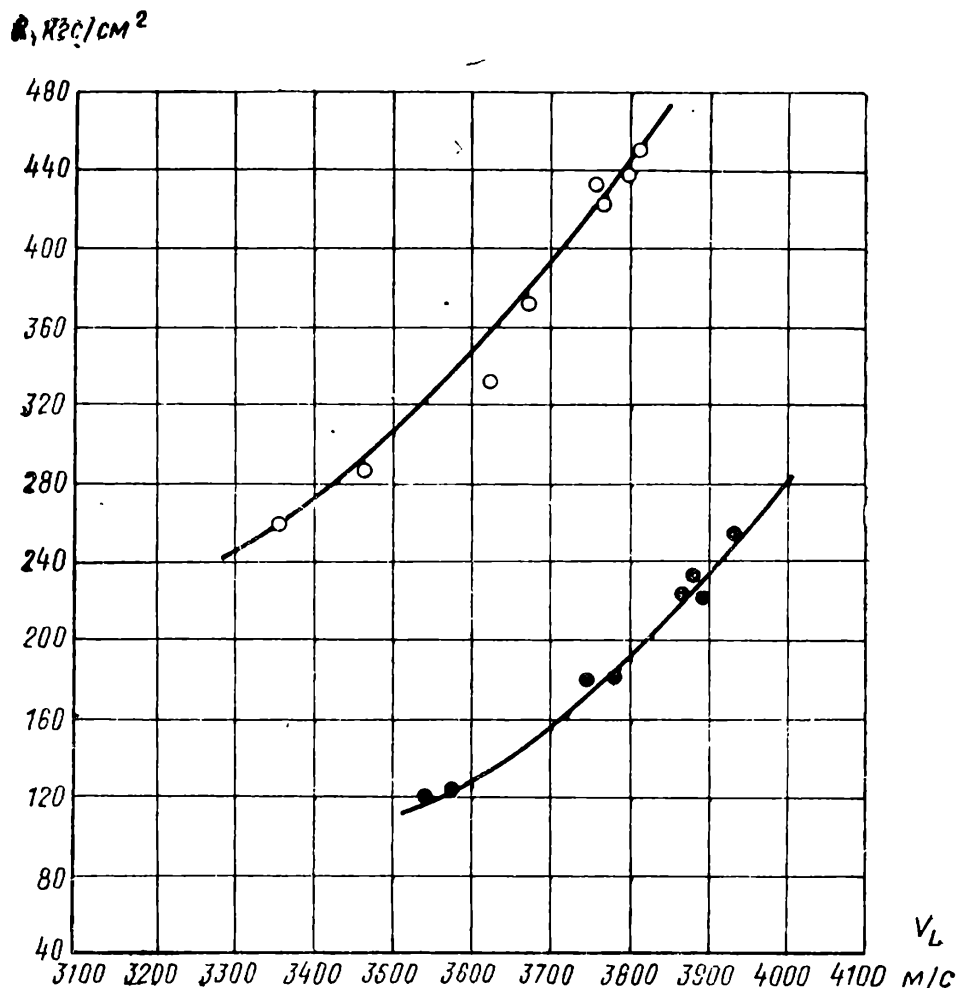
Т а б л и ц а 2.8. Коэффициенты влияния дозировки цемента

Дозировка цемента в кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент влияния $C_d$	Дозировка цемента в кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент влияния $C_d$
100	0,46	300	1
150	0,61	350	1,11
200	0,75	400	1,21
250	0,88	450	1,3
		500	1,38

Влияние дозировки на зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью бетона при сжатии является определяющим и составляет основную часть ошибки метода контроля прочности бетона. Современные исследования в этой области предполагают разработку единого неразрушающего метода для определения дозировки цемента. В числе методов,

Рис. 2.59. Зависимость  $R_c - v_L$  для бетона и цементного камня

○ — цементный камень;  
● — бетон с максимальной крупностью заполнителя 30 мм



$R, \text{кгс/см}^2$

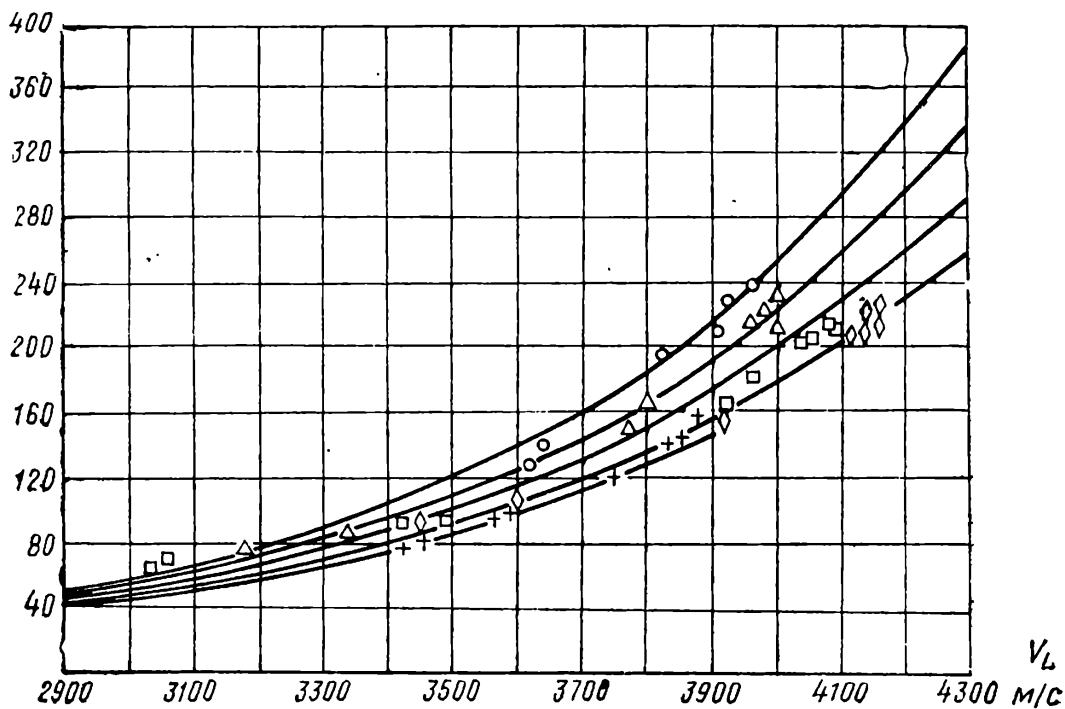


Рис. 2.60. Влияние дозировки на зависимость  $R - v_L$

○ = 400 кг/м³; △ =  
— 350 кг/м³; □ =  
— 300 кг/м³; ◇ =  
— 250 кг/м³; + =  
— 200 кг/м³

от которых ожидают положительных результатов, отмечаются: метод активации нейтронами, метод определения химически связанной воды и пр.

**2.5.10.5. Влияние вида заполнителя.** Свойства заполнителя и его вид оказывают значительное влияние на зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью бетона при сжатии, так как бетонная смесь почти на 80% состоит из заполнителя. Скорость распространения в заполнителе больше скорости распространения в бетоне, особенно в таких, как сидерит, кварц, базальт, твердый известняк; следовательно, формально решающее влияние имеет скорость распространения ультразвука в заполнителе. Однако изменение свойств заполнителя оказывает гораздо меньшее влияние на механическую прочность бетона, чем на скорость распространения ультразвука.

В связи с влиянием скорости распространения в заполнителе на скорость распространения в бетоне необходимо принять во внимание тот факт, что заполнитель находится в бетоне в виде зерен, размеры которых изменяются, и что скорость распространения в этих зернах — величина не постоянная, даже если зерна происходят из одной и той же материнской породы. Граничные условия на поверхности заполнителя, которую обволакивает бетон, занимают промежуточное положение между условиями, соответствующими открытой поверхности заполнителя, и поверхностью заполнителя, когда совершенно отсутствуют смещения, т. е. как в целой массе породы.

Были выполнены испытания бетона, приготовленного с заполнителем разных пород, для того, чтобы найти зависимость между скоростью распространения волн в бетоне  $v_R$ , в цементном камне  $v_c$  и в материнской породе, из которой был извлечен заполнитель  $v_b$ . Можно видеть, что связь их может быть выражена уравнением общего вида:

$$v_b = Xv_c + (1 - X) \alpha v_R. \quad (2.54)$$

где  $X$  — относительный объем цементного камня, включая поры в нем;  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от зернового состава заполнителя.

Чем заполнитель мельче и больше отличается от круглой формы (игольчатый или плоский), тем  $\alpha$  меньше. Интервал, в пределах которого изменяется  $\alpha$ , 0,75—0,8.

Соотношение (2.54) нужно нам тогда, когда мы обращаемся к зависимости «скорость — прочность бетона», используя в ней скорость распространения ультразвука в цементном камне. Несмотря на то что это соотношение многообещающее, очевидно, что до его практического применения еще далеко из-за неопределенности в выборе  $X$ ,  $\alpha$  и  $v_R$ .

Практические результаты были получены путем испытаний бетона с различными видами тяжелого дробленого (рис. 2.61) и легкого (рис. 2.62) заполнителя. Если взять отношение прочности, полученной в бетоне с речным кварцевым заполнителем, к прочности бетона с дробленным тяжелым или легким заполнителем для типов, указанных в табл. 2.9, можно получить прочность, соответствующую данной скорости распространения ультразвука, путем умножения прочности бетона с той же скоростью распространения на коэффициент влияния вида заполнителя, приведенный в табл. 2.9.

Рис. 2.61. Зависимость  $R_c—v_L$  для бетона с тяжелым заполнителем

○ — заполнитель речной; △ — базальт; □ — известняк; ▲ — гранит; ● — андезит

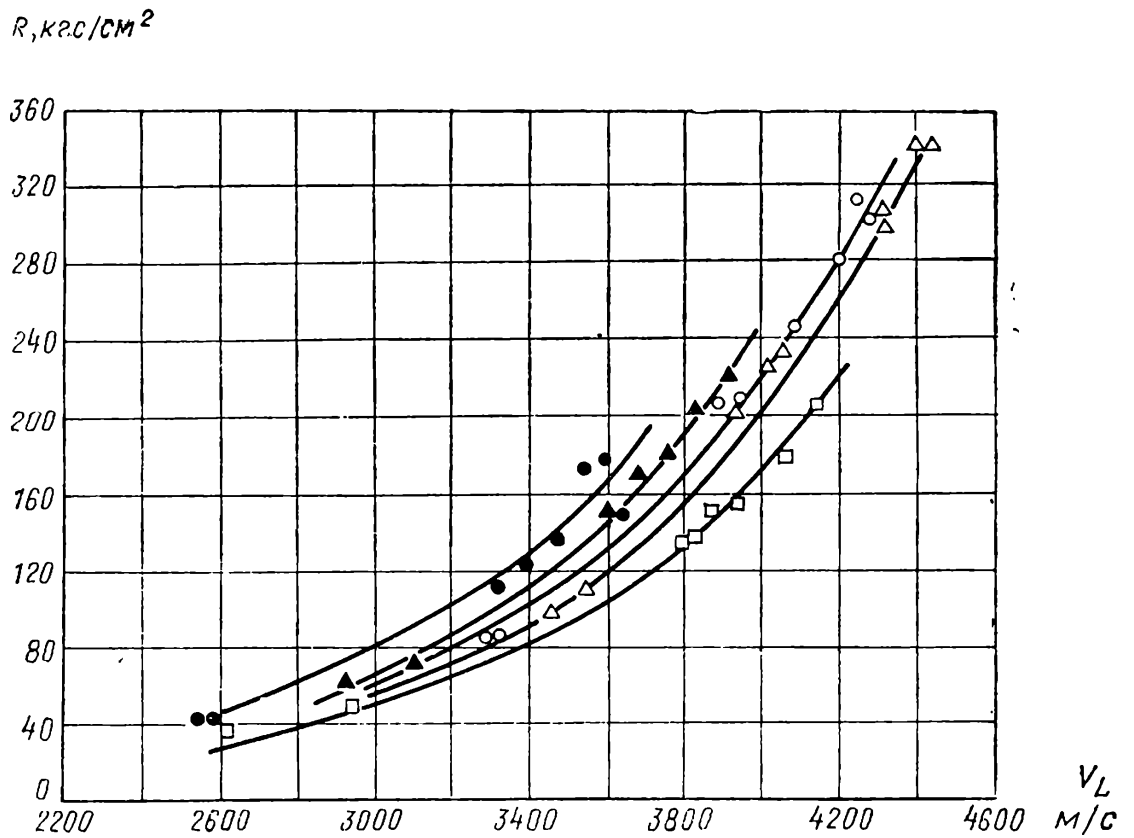
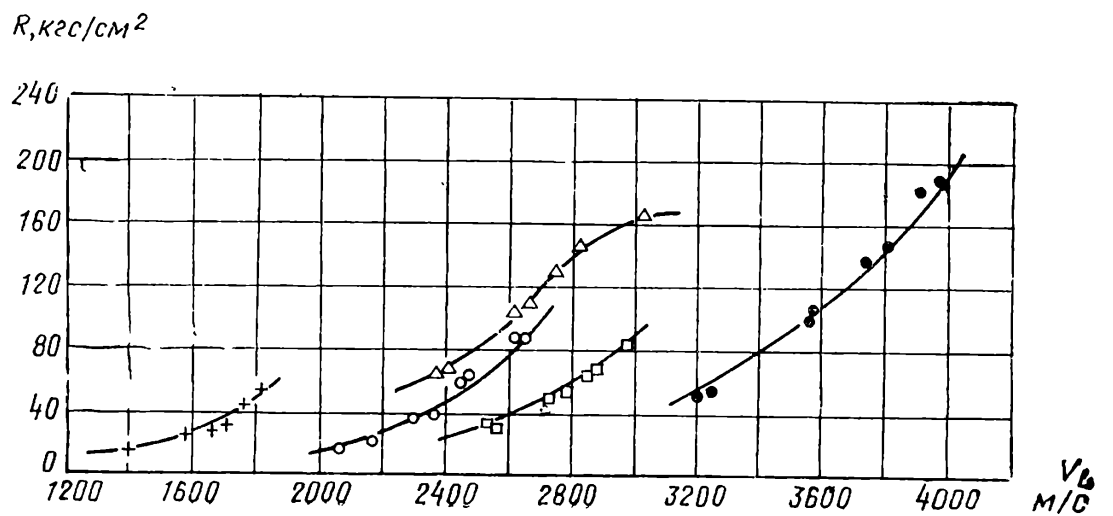


Таблица 2.9. Коэффициенты влияния вида заполнителя

Заполнитель	Коэффициент влияния $C_a$	Заполнитель	Коэффициент влияния $C_a$
Речной кварцит . . . . .	1	Глина вспученная (керамзит) . . . . .	2,1
Андезит дробленый . . . . .	1,24	Диатомит . . . . .	6
Гранит » . . . . .	1,09	Шлак базальтовый . . . . .	4
Базальт » . . . . .	0,91	Керамика дробленая . . . . .	5
Известняк » . . . . .	0,82		

Рис. 2.62. Зависимость  $R_c—v_L$  для бетона с легким заполнителем

+ — диатомит; △ — керамика; ○ — шлак; □ — вспученная глина; ● — речной заполнитель



Если для приготовления бетона применяется смешанный заполнитель, например частично речной, частично базальтовый, то коэффициент влияния заполнителя необходимо определять на основании формулы

$$C_a = X_1 C_1 + X_2 C_2, \quad (2.55)$$

где  $X_1$  и  $X_2$  — соотношение объемов двух видов<sup>3</sup> заполнителей.

В соответствии с данными табл. 2.9 выбирают коэффициенты влияния в зависимости от использованного заполнителя, которые значительно отличаются для различных пород и в каждом случае определяются в соответствии с методикой, указанной в разделе 2.5.10.1. Эта методика применима для тяжелого заполнителя, не указанного в табл. 2.9. Значения, приведенные в табл. 2.9, дают хорошую ориентировку, когда испытания с помощью тарировочной кривой невозможны.

**2.5.10.6. Влияние зернового состава заполнителя.** Зерновой состав оказывает важное влияние на зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью бетона, поскольку определяет условия распространения импульса в бетоне, которые, в свою очередь, находятся в зависимости от отношения длины волны ультразвука и диаметра заполнителя. С другой стороны, зерновой состав влияет на прочность бетона, как и на скорость распространения: чем заполнитель богаче мелкими фракциями, тем прочность бетона меньше, но в то же время и скорость распространения снижается.

Было проверено экспериментально на образцах-призмах влияние зернового состава заполнителей при изменении двух параметров:

мелких фракций заполнителя (0—1 мм);

максимального диаметра заполнителя  $\Phi_{\text{макс}}$ .

Влияние мелкой фракции было исследовано на бетоне, в котором заполнитель содержал мелкую фракцию в пределах 6—54% общего веса заполнителя. На этом бетоне были выполнены измерения скорости распространения и затем определена прочность бетона при сжатии. Результаты испытания приведены на рис. 2.63. Графики показывают, что по мере того как количество мелких фракций увеличивается, увеличивается и соответствующая прочность бетона при данной скорости распространения. Это заключение можно сформулировать таким образом: при увеличении количества мелких фракций в заполнителе скорость распространения снижается быстрее, чем прочность бетона на сжатие.

Если взять в качестве основы прочность бетона, полученную с заполнителем, имеющим мелкую фракцию (0—1 мм) 12%, тогда прочность бетона с различным содержанием мелкой фракции заполнителя получают с помощью коэффициентов из табл. 2.10.

Т а б л и ц а 2.10. Коэффициент влияния мелкой фракции

Фракция 0—1 мм, %	Коэффициент влияния $C_g$	Фракция 0—1 мм, %	Коэффициент влияния $C_g$
6	0,96	30	1,12
12	1	42	1,2
18	1,04	54	1,28

Другими словами, **измеряя** некоторую скорость распространения для получения фактической прочности испытываемого бетона, необходимо прочность бетона, которая принята в качестве стандартной, умножить на коэффициент влияния  $C_g$ , приведенный в табл. 2.10.

Другой вспомогательный элемент, с помощью которого можно характеризовать зерновой состав заполнителя, — максимальный диаметр заполнителя. Испытания, выполненные на бетоне с заполнителем, имеющем максимальный диаметр менее 30 мм (рис. 2.64) и более 30 мм (рис. 2.65), показали, что с увеличением максимального диаметра заполнителя прочность на сжатие, соответствующая заданной постоянной скорости распространения, уменьшается. Установление этого факта можно сформулировать следующим образом: по мере того как максимальный диаметр заполнителя увеличивается, скорость распространения в бетоне повышается относительно быстрее, чем прочность бетона. Объяснение этого факта заключается в том, что скорость распространения в заполнителе больше, чем в бетоне, и приближается к скорости распространения в бесконечной среде — в массиве соответствующей горной породы.

Возвращаясь к соотношению, которым следует пользоваться при испытаниях с помощью ультразвука, примем за основу бетон с заполнителем, имеющем максимальный диаметр 30 мм, тогда прочность бетона с заполнителем любого максимального диаметра и соответствующую ей скорость можно получить путем умножения на коэффициенты влияния, приведенные в табл. 2.11.

Таблица 2.11. Коэффициенты влияния максимального диаметра заполнителя

Максимальный диаметр заполнителя в мм	Коэффициент влияния $C_f$	Максимальный диаметр заполнителя в мм	Коэффициент влияния $C_f$
70—80	0,94	7	1,12
30	1	3	1,25
15	1,05	1	1,71

В связи с влиянием максимального диаметра заполнителя необходимо избегать испытания ультразвуком образцов, размеры которых не превышают по крайней мере 4—5-кратного максимального диаметра применяемого заполнителя.

**2.5.10.7. Влияние влажности бетона.** Не будем рассматривать влияние случайного увлажнения на зависимость между скоростью распространения и прочностью бетона, так как это уже рассмотрено в разделе 2.5.1. Ниже обсуждается влияние влажности как постоянного фактора, участвующего во все время процесса твердения бетона, вплоть до испытания.

Проведенные испытания относились к бетону, хранившемуся при влажности воздуха 40—60% или погруженному в воду и, следовательно, полностью насыщенного водой. Результаты, полученные для бетонов различного состава, с учетом таких параметров, как способ уплотнения и возраст, приведены на рис. 2.66. Из графика видно, что при той же скорости распространения бетон, хранившийся в воде, характеризуется меньшей чувствительностью к изменениям прочности при сжатии, чем бетон, хранившийся на воздухе.



$R, \text{кгс/см}^2$

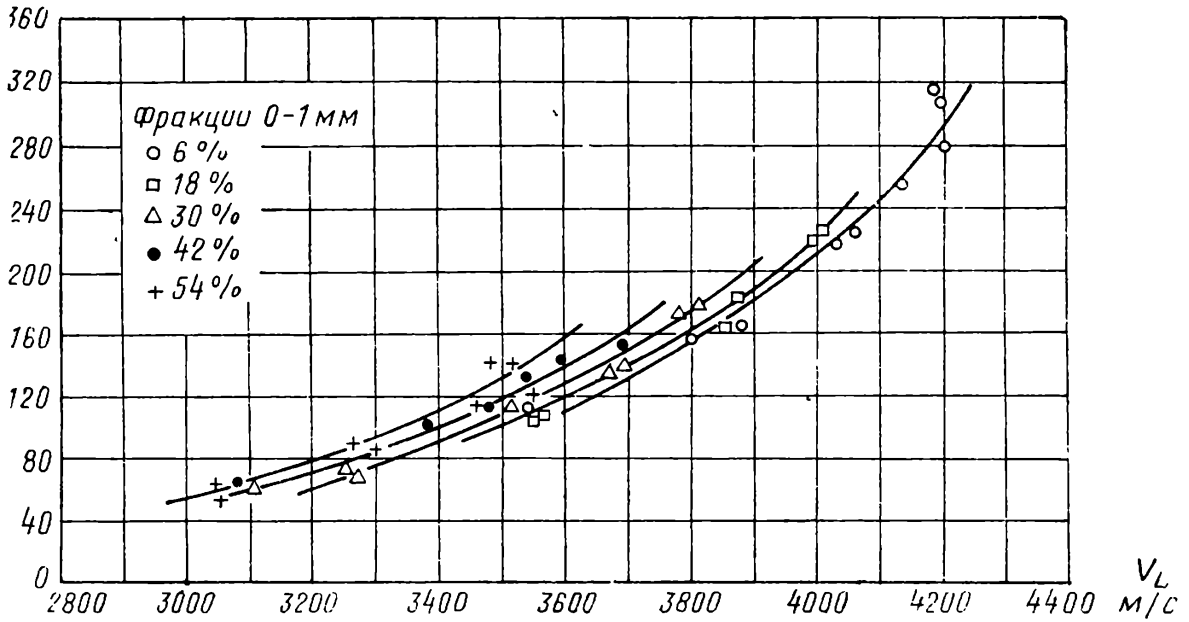


Рис. 2.63. Влияние мелкой фракции (0—1 мм) заполнителя на зависимость  $R_c—v_L$

$R, \text{кгс/см}^2$

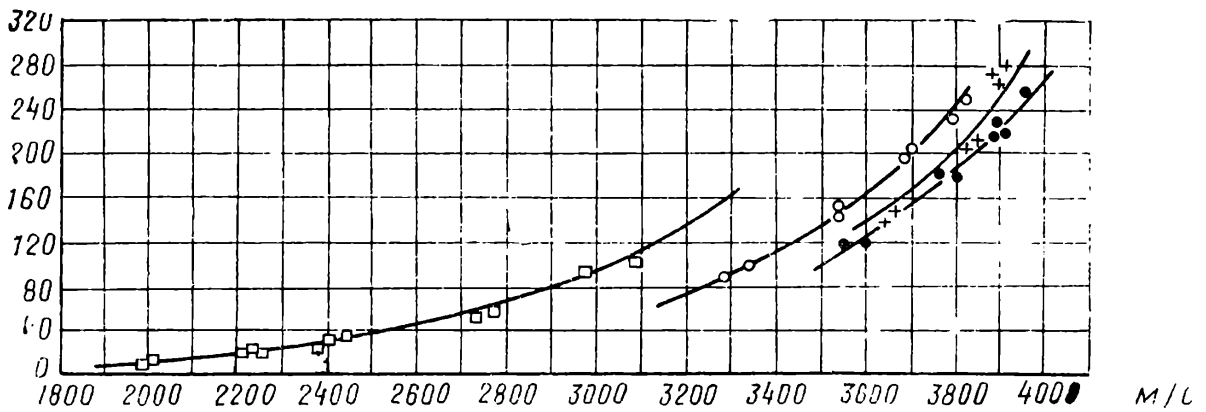


Рис. 2.64. Зависимость  $R_c—v_L$  для бетона с заполнителем  $\varnothing_{\text{max}} < 30 \text{ мм}$ ;  $\square \varnothing \le 1 \text{ мм}$ ;  $\circ \varnothing \le 3 \text{ мм}$ ;  $+ \varnothing \le 7 \text{ мм}$ ;  $\bullet \varnothing \le 30 \text{ мм}$

$R, \text{кгс/см}^2$

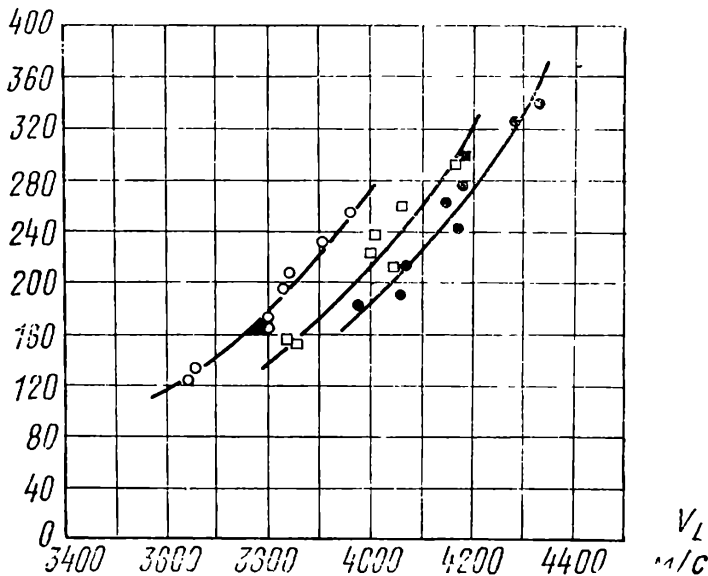
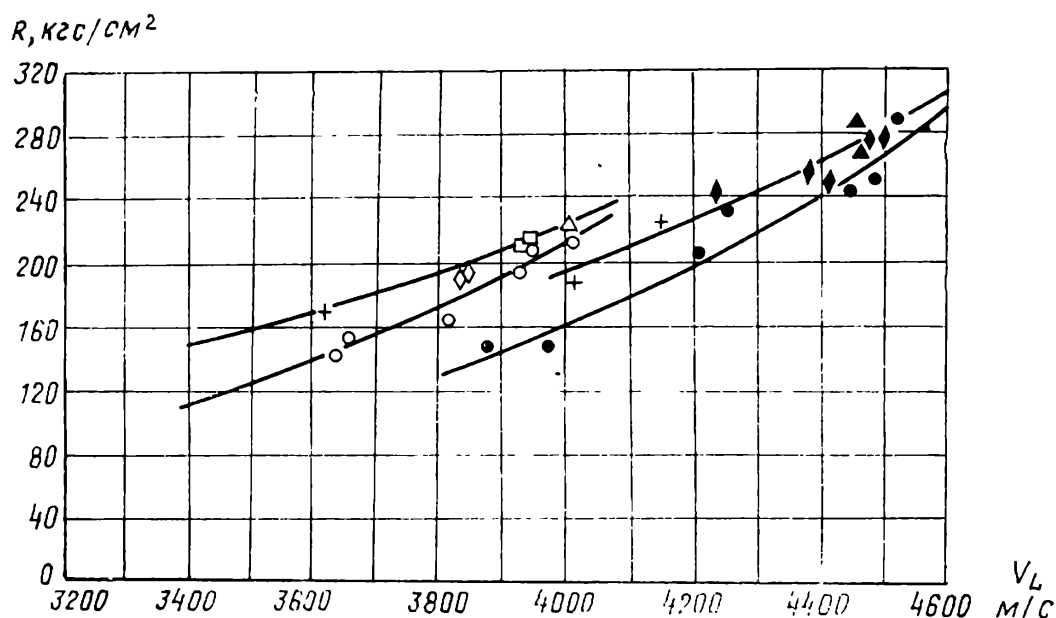


Рис. 2.65. Зависимость  $R_c—v_L$  для бетона с заполнителем  $\varnothing \le 70 \text{ мм}$ ;  $\circ \varnothing \le 15 \text{ мм}$ ;  $\square \varnothing \le 30 \text{ мм}$ ;  $\bullet \varnothing \le 70 \text{ мм}$

Рис. 2.66. Влияние влажности бетона на зависимость  $R_c - v_L$

● — в воде в возрасте 3—28 сут.;  
 ○ — на открытом воздухе в возрасте 3—28 сут., время уплотнения:  
 ■, □ — 1 мин;  
 ◆, △ — 20 с;  
 ◇, ▲ — 5 с;  
 + — без уплотнения



Это физическое явление может быть выражено следующим образом: при одинаковой механической прочности бетон, хранившийся в воде, характеризуется более высокой скоростью распространения, чем бетон, хранившийся на открытом воздухе. В то время как для бетона при подводном хранении при наибольшей прочности скорость распространения достигла величины 4600 м/с — практически предельной, для такой же прочности образца, хранившегося на воздухе, скорость распространения остановилась на величине около 4100 м/с.

Если принять в качестве опорной влажность, соответствующую хранению куба со стороной 20 см в течение 1 суток в опалубке, в течение последующих 6 суток под водой или же непрерывно во влажном песке и в течение последних 21 суток на открытом воздухе, то режим, который почти одинаков с режимом твердения массивных железобетонных элементов на строительстве, т. е. соответствует сохранению опалубки в течение 10—14 суток, можно признать как стандартный. Механическая прочность бетона, сохраняемого непрерывно на открытом воздухе или в воде, по отношению к прочности бетона, хранение которого принято за стандартное, при одинаковой скорости распространения определяется умножением на коэффициент  $C_u$  из табл. 2.12.

Таблица 2.12 Коэффициент влияния влажности бетона

Влажность бетона (условия хранения)	Коэффициент влияния $C_u$
На открытом воздухе . . . . .	1,04
Стандартное (1 сутки в опалубке, 6 суток в воде + 21 сутки на открытом воздухе) . . . . .	1
В воде . . . . .	0,8

Коэффициент влияния влажности  $C_u$  — величина, на которую необходимо умножать, учитывая фактическую влажность, стандартную прочность бетона для получения фактической прочности испытываемого бетона при одинаковой скорости распространения.

Чтобы объяснить физический смысл этих результатов, следует обратиться к следующим фактам:

а) хранение бетона под водой благоприятствует более высокой степени гидратации и образованию большого количества продуктов гидратации, на которые скорость распространения ультразвука реагирует больше, чем при твердении бетона на воздухе;

б) подводное хранение бетона благоприятствует полному заполнению пор водой, замещающей воздух, который находился в большинстве пор до погружения в воду. Скорость распространения звука в воде составляет 1450 м/с вместе 330 м/с в воздухе.

В этих условиях бетон, хранившийся в воде, характеризуется значительно большей скоростью распространения, чем в случае хранения на воздухе, даже если пренебречь увеличением прочности, которая тоже повышает скорость.

**2.5.10.8 Влияние созревания бетона.** Другие факторы, которые оказывают влияние на соотношение между скоростью и прочностью, — это возраст и температура. Из указанных факторов под вторым из них следует подразумевать температуры выше 0°. Комбинация этих двух факторов, которые фактически взаимосвязаны и являются причиной роста прочности бетона, позволяет синтезировать так называемый фактор созревания, определяемый на основе уравнения

$$f = \sum_{i=1}^n (\theta_i + 10) t_i, \quad (2.56)$$

где  $\theta_i$  — температура в градусах Цельсия (°С) в определенном интервале  $i$ ;  $t_i$  — количество суток с одинаковым интервалом температур  $\theta_i$ ;  $n$  — количество интервалов  $i$  с разными температурами  $\theta_i$ .

В первую очередь исследования были проведены с бетоном различной плотности, разного возраста — от 3 суток и до 8 месяцев — и хранившемся при температуре 20—25°С. Результаты испытаний даны на рис. 2.67.

Из графика видно, что по мере того, как возраст бетона увеличивается, прочность бетона при сжатии, соответствующая данной скорости распространения, увеличивается; достигнутая разница может быть значительной даже при сравнении возрастов (3—28 суток), не говоря уже о том, что было проведено сопоставление данных с испытаниями бетона, проведенными в возрасте 8 месяцев (см. рис. 2.67).

Чтобы сравнить результаты, при которых температура хранения не одинаковая, для проверки применимости формулы (2.56) был испытан бетон одного возраста при хранении с различными интервалами температур (при пониженной температуре, близкой к 0°). Результаты испытания приведены на рис. 2.68, из которого видно, что по мере того, как температурный интервал при 0° был более продолжительным, прочность, соответствующая заданной скорости распространения, снижалась (нижняя кривая на рис. 2.68). Этот факт показывает, что влияние возраста и температура твердения эквивалентны и что можно учитывать фактор созревания по формуле (2.56). Во всех этих выводах предполагается, что при температуре выше или даже около 0° вода в бетоне не замерзает. Если температура была заметно ниже 0°, в особенности в первые дни после приготовления, и вода в порах

$R, \text{кгс/см}^2$

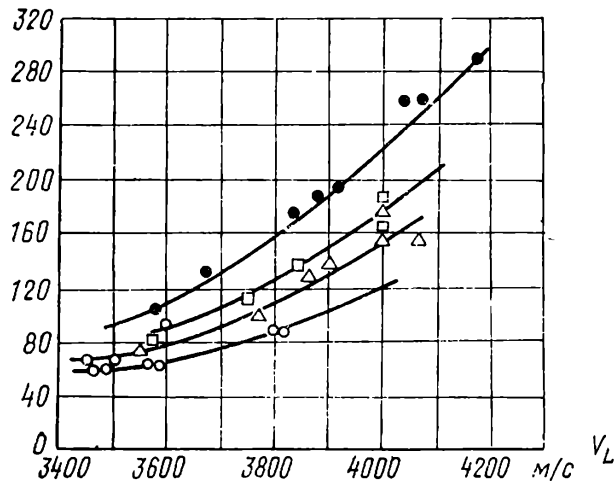


Рис. 2.67. Влияние возраста бетона на соотношение  $R-v_L$

○, △, □, ● — возраст 3, 7, 28 сут., 8 мес.

$R, \text{кгс/см}^2$

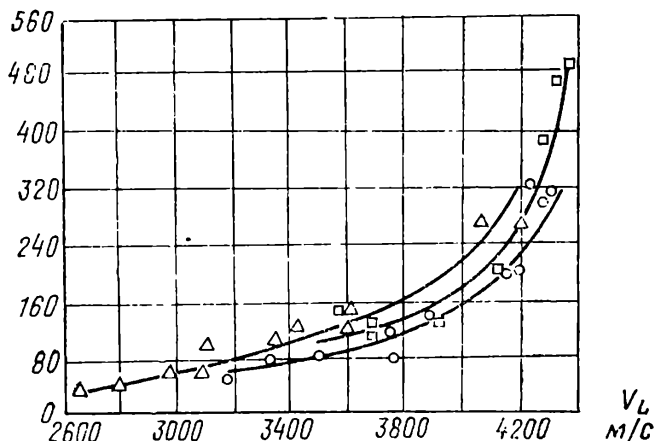


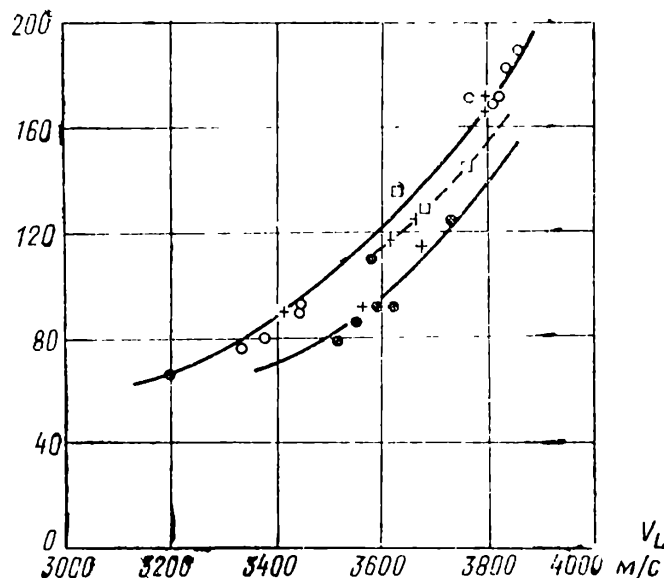
Рис. 2.69. Влияние добавки  $\text{CaCl}_2$  на зависимость  $R-v_L$

○ —  $\text{CaCl}_2$  — 0%;    ■ —  $\text{CaCl}_2$  — 2%;    △ —  $\text{CaCl}_2$  — 4%

Рис. 2.68. Влияние температуры твердения на зависимость  $R-v_L$

○ — температура  $20^\circ\text{C}$  — 56 сут.; □ — 11 сут. до  $20^\circ\text{C}$  + 17 сут. до  $0^\circ$  + 28 сут. до  $20^\circ\text{C}$  + 8 сут. до  $20^\circ\text{C}$  + 20 сут. до  $0^\circ$  + 28 сут. до  $20^\circ\text{C}$ ; ● — 5 сут. до  $20^\circ\text{C}$  + 23 сут. до  $0^\circ\text{C}$  + 28 сут. до  $20^\circ\text{C}$

$R, \text{кгс/см}^2$



замерзла, происходит разрушение бетона вследствие расширения льда. В этом случае следует отказаться от применения фактора созревания.

Для использования результатов, представленных выше, показывающих влияние твердения бетона в различном возрасте на соотношение «скорость — прочность», применим исходную цифру 1000 «суток × градусы» при условии, что температура хранения была  $25^\circ\text{C}$ . Прочность бетона того же состава, но с другим фактором созревания по отношению к бетону, принятому в качестве рекомендуемого для одинаковой скорости распространения приводится в табл. 2.13 в виде коэффициентов влияния.

Влияние созревания бетона на соотношение «скорость распространения — прочность при сжатии» можно пояснить следующим рассуждением. Первичное физико-химическое превращение, которое происходит при твердении бетона, является важным процессом, в большей степени увеличиваю-

Таблица 2.13. Коэффициенты влияния созревания бетона

Фактор созревания в сутках $\times$ $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент влияния $C_m$	Фактор созревания в сутках $\times$ $^{\circ}\text{C}$	Коэффициент влияния $C_m$
100	0,73	3100	1,1
250	0,87	6300	1,18
500	0,95	13 000	1,24
1000	1	65 000	1,36

щим скорость распространения упругих волн, чем прочность бетона. Превращение структуры и следующее за ним явление твердения, хотя и приводит к увеличению прочности, почти не изменяет существенно скорости распространения. Больше того, с возрастом скорость распространения может даже незначительно снижаться благодаря внутреннему процессу образования микротрещин и возрастающей потери поровой воды. Несомненно, что рост скорости распространения ультразвука незначителен при запоздалом твердении.

**2.5.10.9. Влияние добавок.** Благодаря разнообразию добавок, которые могут быть использованы в бетоне, проблема влияния их на зависимость «скорость — прочность» является особенно сложной задачей.

Одной из наиболее часто встречающихся добавок является хлористый кальций ( $\text{CaCl}_2$ ), применяемый при бетонировании в зимнее время. На рис. 2.69 показано влияние добавки  $\text{CaCl}_2$  на зависимость «скорость — прочность» при различном содержании добавки по отношению к вяжущему, выраженному в процентах. Мы видим, что по мере того как процентное содержание  $\text{CaCl}_2$  для приготовления бетона увеличивается, увеличивается и прочность, соответствующая заданной скорости распространения. Если взять в качестве опорного бетон без добавки, тогда в зависимость, по которой находят прочность бетона с добавкой, вводят коэффициент из табл. 2.14.

Таблица позволяет выразить в виде математического выражения соотношение между коэффициентом  $C_p$  и добавкой, выраженной в процентах:

$$C_p = 1 + \frac{p}{10} . \quad (2.57)$$

Влияние добавки хлористого кальция на зависимость «скорость — прочность» объясняется тем, что она способствует ускорению создания структуры бетона, для которой характерно снижение скорости распространения ультразвука и возникновение внутренних микротрещин в бетоне без заметного влияния на механическую прочность.

Другой добавкой, которая влияет на зависимость «скорость — прочность», является природная смола, названная RESO, применяемая как пластификатор. На рис. 2.70 приведены результаты испытаний бетона без добавки и с добавкой RESO в количестве 0,06 и 0,12%. На рис. 2.70 видно, что по мере того как увеличивается процентное содержание применяемой добавки, увеличивается и прочность, соответствующая данной скорости распространения.

В табл. 2.15 приведены коэффициенты влияния, где в качестве исходного (опорного) принят бетон без добавки. Значения, приведенные в таблице, представляют собой соотношение между прочностью бетона с добавкой и прочностью бетона, принятого за исходную при одинаковой скорости распространения.

Таблица 2.14. Коэффициент влияния добавки  $\text{CaCl}_2$

Содержание добавки в %	Коэффициент влияния $C_p$
0	1
2	1,19
4	1,4

Таблица 2.15. Коэффициенты влияния добавок RESO

Содержание добавки в %	Коэффициент влияния $C_p$
0	1
0,06	1,15
0,12	1,3

Было бы, однако, ошибкой делать вывод на основе этого примера, что присутствие любой добавки в бетонной смеси допускает применение коэффициента влияния в зависимости «скорость — прочность». В качестве примера в указанном выше смысле предлагается лигносульфонат кальция (рис. 2.71). Из графика видно, что имеется единая кривая соотношения «скорость — прочность». Этот факт подтверждает очевидное преимущество при проведении контроля бетона, в котором применяется такая добавка. В этом случае коэффициент влияния добавки равен 1, т. е. фактически он не нужен.

**2.5.10.10. Определение прочности при сжатии на основе измерений скорости распространения.** Конечная цель содержания разделов 2.5.10.2—2.5.10.9 заключается в определении прочности бетона на сжатие в сооружении. На практике, исключая раздел 2.5.10.1, в котором рассматривается тарировочная кривая, возможны следующие ситуации:

- известен состав бетона, но нет образцов или кернов испытываемого бетона;
- известен состав бетона и имеются образцы в ограниченном количестве или несколько кернов, взятых из бетона;
- не известен состав бетона, подлежащего испытанию, но имеются образцы или керны из этого бетона;
- не известен ни состав бетона и не имеется ни образцов, ни кернов из этого бетона.

Решение поставленных вопросов требует введения такого понятия, как исходный или стандартный бетон. Этот стандартный (исходный) бетон характеризуется следующими величинами, установленными параметрами состава и условий хранения:

цемент: вид портландцемента (P400, PZ400, C400, M400, T25), дозировка  $300 \text{ кг/м}^3$ ;

заполнитель: речной кварцит  $\Phi_{\text{макс}} = 30 \text{ мм}$ , фракция 0—1 мм, 12%;

хранение: стандартное (1 сутки в опалубке + 6 суток в воде + 21 сутки на открытом воздухе);

фактор созревания: 1000 суток  $\times$  °C (возраст 28 суток, температура 25° C);

добавки: не содержит.

$R, \text{кгс/см}^2$

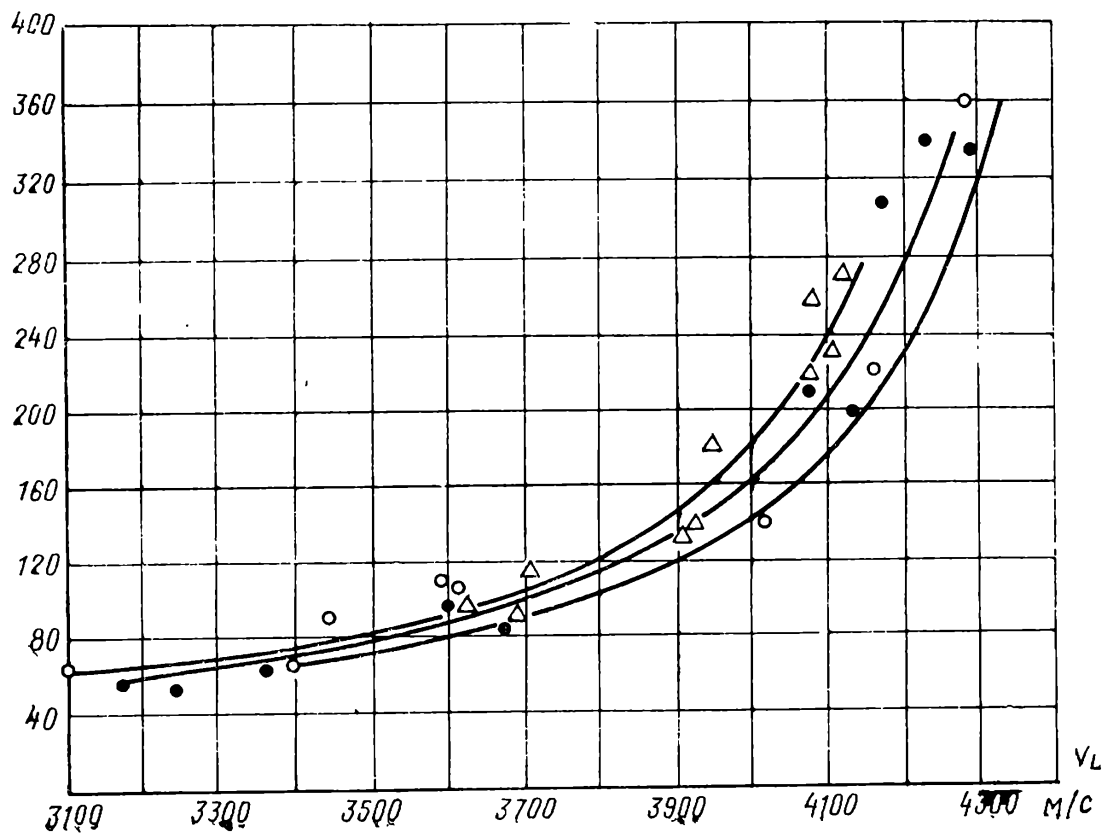


Рис. 2.70. Влияние добавки RESO на соотношение  $R-v_L$

○ — 0%;  
● — 0,06%;  
△ — 0,12%

$R, \text{кгс/см}^2$

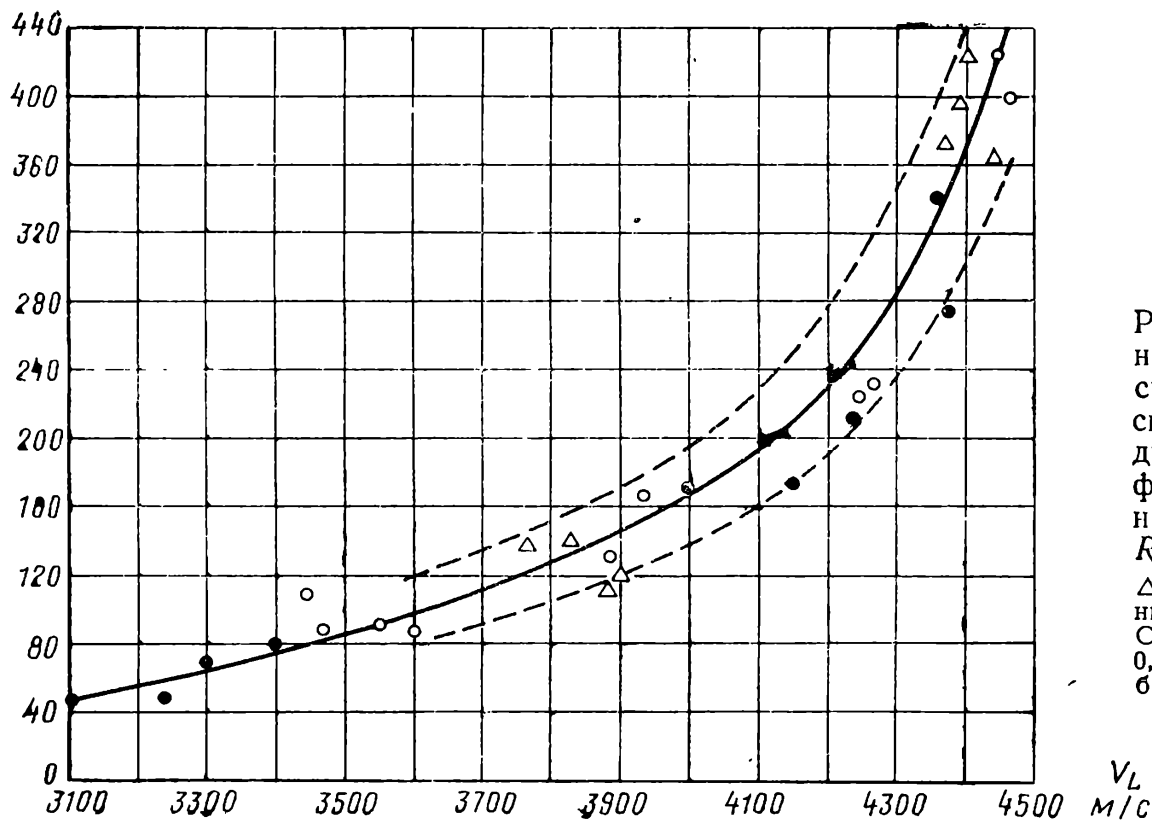


Рис. 2.71. Влияние добавки сульфитно-спиртовой барды (лигносульфонат кальция) на соотношение  $R-v_L$

△ — бетон обычный (тяжелый);  
○ — с добавкой 0,2%; ● — с добавкой 0,4%

Для этого бетона основное соотношение преобразуется в экспоненциальное уравнение:

$$R_c = ae^{bv}, \quad (2.58)$$

где постоянные  $a$  и  $b$  определяются из:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= 80 \text{ кгс/см}^2; \\ v_1 &= 3200 \text{ м/с}; \end{aligned} \right\} \quad (2.59, \text{ а})$$

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= 240 \text{ кгс/см}^2; \\ v_2 &= 4200 \text{ м/с} \end{aligned} \right\} \quad (2.59, \text{ б})$$

или

$$b = \frac{\ln \frac{R_2}{R_1}}{v_2 - v_1} = 1,1 \text{ с/км}; \quad (2.60)$$

$$\log a = \log R_2 - bv_2 \log e = 0,380 \quad (2.61)$$

или

$$a = 2,4 \text{ кгс/см}^2. \quad (2.62)$$

Соотношения (2.60) и (2.62) вполне точно определяют исходную зависимость для стандартного бетона, приведенного на рис. 2.72 и в табл. 2.16, против коэффициента  $C_t = 1^*$ .

Если бетон для испытания отличается от стандартного бетона, необходимо вычислить так называемый общий коэффициент влияния. Этот коэффициент отражает сумму всех параметров как состава бетона, так и хранения, которые отличаются от стандартного бетона. Он вычисляется по определению в виде произведения

$$C_t = C_c C_d C_a C_g C_\phi C_u C_m C_p. \quad (2.63)$$

В формуле (2.63) условно предполагается, что коэффициенты влияния не зависимы между собой для того, чтобы можно было применить метод наложения. Такая предпосылка выполняется для большинства коэффициентов влияния в любых условиях. Небольшая часть из этих коэффициентов влияния

\* Формулы (2.59, а) — (2.62) дают числовые значения, которые пригодны только для бетонов, использованных в опытах авторов (примеч. науч. ред.).

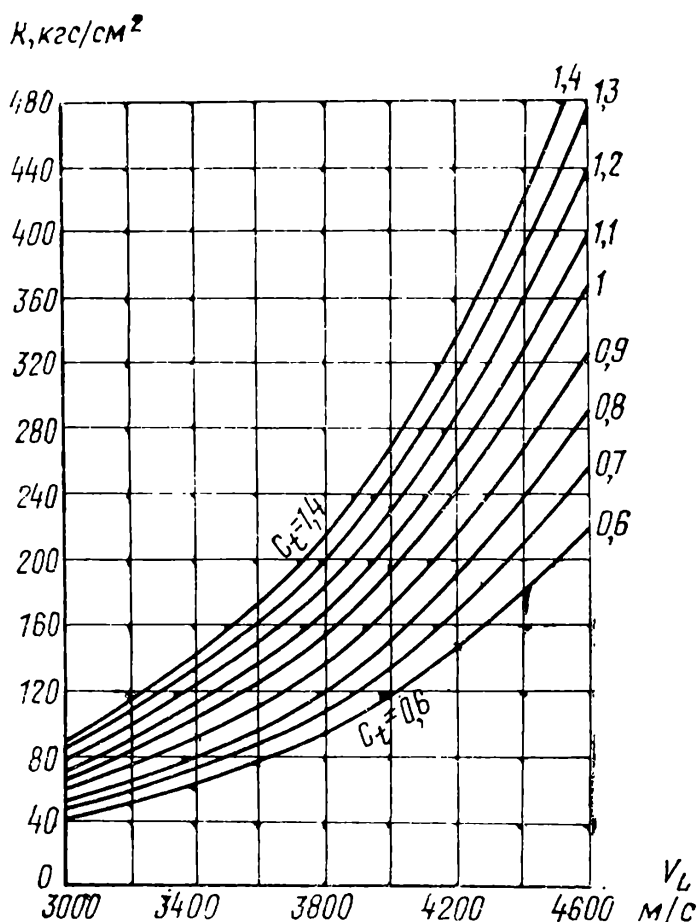


Рис. 2.72. Семейство кривых зависимости «скорость — прочность»



в незначительной степени взаимозависимы, но приемлемость соотношения (2.63) сохраняется до тех пор, пока изменения их не слишком велики и находятся в согласии со значениями, которые характеризуют стандартный бетон.

Для вычисления произведения (2.63) пользуются табл. 2.7—2.15. Для получения предела прочности на сжатие, соответствующего любой измеренной скорости распространения, берут значение  $C_t$ , полученное из вычисления произведения отдельных коэффициентов влияния или же из табл. 2.16 или графика на рис. 2.72.

Таблица 2.16 Прочность бетона на сжатие с различными коэффициентами  $C_t$

$v_L$ , м/с	Временное сопротивление на сжатие $R_i$ для значения $C_t$ , кгс/см <sup>2</sup>									
	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
3000	39	45	52	59	65	71	78	84	91	98
3100	43	50	57	65	72	79	86	93	101	108
3200	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120
3300	53	62	71	80	89	98	107	116	126	134
3400	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
3500	67	78	89	100	111	122	134	145	156	167
3600	74	87	99	112	124	136	149	161	174	186
3700	83	97	111	125	139	153	166	181	195	209
3800	93	108	124	140	155	170	186	202	217	233
3900	103	120	137	154	172	189	206	224	241	258
4000	116	135	154	173	193	212	232	251	270	290
4100	129	150	172	193	215	236	258	280	301	323
4200	144	168	192	215	240	264	288	312	336	360
4300	161	187	215	241	268	295	322	349	376	402
4400	179	209	239	269	298	326	356	388	419	447
4500	199	232	265	298	332	365	398	431	465	498
4600	224	260	288	335	372	409	446	484	521	547

Если вычисленные значения находятся вблизи кривых графика 2.72 или же табличных данных в (2.16), применяется основная формула (2.58) с постоянными  $a$  и  $b$ , полученными путем вывода на основе соотношения

$$\left. \begin{aligned} R_1^{\text{эксп}} &= R_1^{\text{станд}} C_t; \\ v_1 &= 3200 \text{ м/с}; \end{aligned} \right\} \quad (2.64)$$

$$\left. \begin{aligned} R_2^{\text{эксп}} &= R_2^{\text{станд}} C_t; \\ v_2 &= 4200 \text{ м/с}, \end{aligned} \right\} \quad (2.64, a)$$

где  $R_1^{\text{эксп}}$  и  $R_2^{\text{эксп}}$  — фактические ординаты кривой зависимости «скорость — прочность» в точках со скоростями  $v_1$  и  $v_2$ .

Если имеются фактические данные по составу бетона, а также есть образцы или керны, это дает возможность уточнить зависимость «скорость — прочность» следующим образом:

1) при испытании образцов или кернов, измеряя скорость распространения ультразвука, следует применять преобразователи, отвечающие условию  $\lambda < d/2$ , в котором  $d$  — минимальный размер поперечного сечения образца. Прозвучивание кернов целесообразнее производить до выбуривания их в ненарушенной структуре бетона с последующим извлечением;

2) испытания на прессе с разрушением образцов при сжатии проводить, обеспечивая статическое нагружение до разрушения (время испытания свыше 1 мин). Путем пересчета получить кубиковую прочность при сжатии для куба со стороной 20 см;

3) определить прочность стандартного бетона ( $C_t = 1$ ) при соответствующей средней скорости распространения, измеренной на каждом образце или каждом керне, пользуясь данными табл. 2.16 или рис. 2.72;

4) вычислить общий коэффициент влияния для каждого образца или керна, испытанного в соответствии с уравнением

$$C_{ti}^{\text{эксп}} = \frac{R_{ci}}{R_{\text{станд } i}}, \quad (2.65)$$

где  $R_{ci}$  — кубиковая прочность, полученная в результате испытания на прессе;  $R_{\text{станд } i}$  — прочность стандартного бетона, имеющего скорость распространения  $v_i$ ;

5) вычислить среднее из экспериментов значение:

$$C_t^{\text{эксп}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ti}^{\text{эксп}}}{n}, \quad (2.66)$$

где  $n$  — количество образцов или имеющихся в наличии кернов.

Желательно иметь в распоряжении не менее трех образцов или кернов. Располагая кернами, необходимо, чтобы они отвечали требованиям извлечения с минимальным нарушением структуры бетона. Разумеется, керны более ценны, чем образцы-кубы;

6) провести сопоставление экспериментального общего коэффициента влияния  $C_t^{\text{эксп}}$  и того, который вычислен на основе состава бетона, т. е.  $C_t^{\text{выч}}$ .

Для ориентировки при определении коэффициентов влияния ниже приводится целый ряд указаний по пределам их применения.

Расхождение между двумя значениями — в пределах

$$\frac{|C_t^{\text{эксп}} - C_t^{\text{выч}}|}{C_t^{\text{эксп}}} < 10\%. \quad (2.67)$$

В этом случае следует считать, что экспериментальные данные подтверждают значения, полученные путем вычисления, и экспериментаторам предоставляется свободный выбор любого из двух значений  $C_t^{\text{эксп}}$  или  $C_t^{\text{выч}}$  или же можно принять среднее значение из них для перерасчета измеренной в конструкции скорости распространения ультразвука в прочность.

Расхождение между двумя значениями заключается в пределах

$$10\% \leq \frac{|C_t^{\text{эксп}} - C_t^{\text{выч}}|}{C_t^{\text{эксп}}} \leq 35\%. \quad (2.68)$$

В этом случае в качестве общего коэффициента влияния принимается среднее значение из полученных экспериментом и расчетом:

$$C_t = \frac{|C_t^{\text{эксп}} + C_t^{\text{выч}}|}{2}. \quad (2.69)$$

Расхождение между двумя значениями больше допускаемого предела:

$$\frac{|C_t^{\text{эксп}} - C_t^{\text{выч}}|}{C_t^{\text{эксп}}} > 35\%. \quad (2.70)$$

В этом случае необходимо проводить подробный анализ для обнаружения причин такого расхождения, принимая во внимание обязательное правило об исключении фиктивных экспериментальных значений. Теоретически существует такая же возможность получения ошибочного значения и для значения  $C_t^{\text{выч}}$  вследствие несоответствия между расчетными данными применяемого состава и фактическими или из-за недооценки истинного влияния других параметров, как-то: термообработки, времени твердения, влажности и пр. Соответственно точно так же  $C_t^{\text{эксп}}$  может быть ошибочной величиной, если образец не имеет правильных геометрических размеров (параллельность плоскостей и взаимная перпендикулярность граней), измерение скоростей было неточным (не отвечает требованиям  $\lambda < d/2$ ), скорость механических испытаний слишком большая, центрировка образца не производилась и пр.

После уточнения причин несовпадения ошибочное значение, предназначенное для исключения, проверяется расчетом. Если не имеется причин для исключения, должен быть пересмотрен весь рабочий процесс измерений на основе средних значений. Если и тогда сохраняется несовпадение двух значений — расчетного и экспериментального, окончательные результаты рассматриваются лишь как ориентировочные.

Когда отсутствуют образцы и керны, предлагается наиболее простой вариант. В этом случае вычисляется только  $C_t^{\text{эксп}}$  в соответствии с указаниями предыдущего параграфа, а именно по образцам, испытанным неразрушающим и разрушающим методами. Значение  $C_t^{\text{эксп}}$  применяют затем для определения прочности по скорости по табл. 2.16 и рис. 2.72 или по уравнениям (2.58)—(2.64). В случае применения образцов в особенности важно, чтобы бетон, пошедший на их приготовление, так же как и условия твердения, были бы аналогичными приготовлению бетона на строительстве. Точность результатов снижается, когда для проведения испытания имеются только образцы или керны и отсутствуют данные о составе бетона сооружения.

Наиболее трудным случаем является такой, когда нет ни образцов, ни данных о составе бетона. В этом случае возможны всякого рода ошибки, по-

этому не рекомендуется применять ультразвуковой импульсный метод. Если практически невозможно произвести все вычисления, необходимо приложить все усилия к тому, чтобы тарировочная кривая «скорость — прочность» была бы выбрана, насколько возможно, ближе к фактической. С этой целью предлагается воспользоваться двумя категориями информации:

общая, в которую входят сведения о проектных марках бетона и данных по изготовлению, и частичная информация;

визуальный осмотр, с помощью которого можно указать приблизительную влажность бетона, затем провести проверку излома поперечного сечения с тем, чтобы получить представление о максимальном диаметре зерен и виде заполнителя, а также о наличии в большом или незначительном количестве мелких фракций. По этим данным выбирают значение соответствующего коэффициента влияния и продолжают вычисления в соответствии с методологией, указанной в пункте 1. Иногда такой метод вычисления может привести к результатам, довольно близким к действительным, но в общем уверенность в получении удовлетворительных результатов невелика.

**2.5.10.11. Точность определения прочности бетона.** Совпадение результатов определения прочности бетона при испытаниях неразрушающим и разрушающим методами может достигать до 90%. Недостаточная точность косвенной оценки прочности бетона определяет причины, из-за которых результаты обычных испытаний разрушением могут отличаться от неразрушающих испытаний на 10%.

В том случае, когда имеется тарировочная кривая, точность получения окончательных результатов при неразрушающих методах с помощью ультразвука должна находиться в пределах  $\pm 10$ —20%. Расположение полученных значений прочности у нижнего или верхнего пределов обусловлено изменениями прочности бетона в самой конструкции.

В том случае, когда известны состав и данные о хранении бетона, а также есть образцы бетона или керны, например из существующего дорожного покрытия, точность также принимается в пределах  $\pm 10$ —20%. Если совпадение между результатами, полученными экспериментальным и расчетным путем, хорошее, тогда точность вычислений повышается и оценивается как  $\pm 10$ —15%; но если совпадение результатов посредственное, тогда погрешность полученных значений находится в пределах  $\pm 15$ —20%.

В случае, когда известен только состав бетона, подлежащего испытанию, точность определения с помощью расчета прочности по скорости принимается в пределах 18—30%. Если существует полная уверенность в том, что все данные по составу и хранению бетона могут быть использованы в расчете и являются реальными, точность вычислений оценивается в пределах 18—25%; если такой уверенности нет, более благоразумным будет принять точность вычислений в интервале 25—30%.

В случае, когда в наличии имеются образцы или керны, взятые из дорожных покрытий или сооружений, вычисления при неразрушающих испытаниях обеспечивают точность от 15 до 25%. Интервал ниже 15—20% относится в основном к кернам, для которых существует уверенность, что они соответствуют бетону в сооружении. Погрешность выше 20—25% принимается для образцов, в отношении которых нет уверенности в том, что они соответствуют составу и условиям твердения бетона в сооружении.

Если не имеется никаких данных о составе и условиях хранения бетона, предназначенного для испытания, нет образцов или кернов из этого бетона, точность метода зависит от возможностей эксперимента и от той информации, которую удастся собрать экспериментатору; в этом случае следует исходить из точности  $\pm 30\text{—}50\%$ .

### 2.5.11. Связь между скоростью распространения и прочностью бетона на растяжение при изгибе

Помимо зависимости «скорость — прочность при сжатии» часто бывает нужно установить связь между скоростью ультразвука и прочностью на растяжение при изгибе. Имеются случаи в производстве бетонных работ, когда важнее других свойств — прочность бетона на растяжение.

Можно указать на множество аналогий, которые существуют между зависимостями «скорость — прочность при сжатии» и «скорость — прочность при растяжении». Для подтверждения сказанного допускаем, что связь между двумя прочностями более тесная, чем между скоростью распространения ультразвука и любой их двух видов прочности бетона.

Прочность на растяжение при изгибе бетона определяется на образце размером  $10 \times 10 \times 55$  см из уравнения

$$R_{ti} = \frac{M}{W} = \frac{M}{\frac{1}{3,5}bh^2}. \quad (2.71)$$

Существует возможность получения тарировочной кривой на основе тех же предпосылок, которые встречаются на заводе по изготовлению сборных элементов, а также в научных исследованиях в области контроля качества. Для этого необходимо располагать минимум 15 образцами, сгруппированными в пять серий по три образца в каждой. Серии отличаются между собой степенью уплотнения бетона и отношением  $V/C$ .

Если для получения тарировочной кривой нет данных, обращаются к графическим или аналитическим способам, аналогичным изложенным в разделе 2.5.10. С этой целью необходимо снова вернуться к ранее принятому понятию «исходный бетон», иначе называемый «стандартным», и коэффициентам влияния.

Исходный бетон был установлен выше в разделе 2.5.10.10.

Такой бетон характеризуется одним из соотношений «скорость — прочность на растяжение бетона» в виде

$$R_{ti} = Ce^{dv}, \quad (2.72)$$

в котором постоянные  $C$  и  $d$  определяются из условия

$$\left. \begin{aligned} R_{ti}^{(1)} &= 11 \text{ кгс/см}^2; \\ v_1 &= 3200 \text{ м/с}; \end{aligned} \right\} \quad (2.73)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{ti}^{(2)} &= 29 \text{ кгс/см}^2; \\ v_2 &= 4200 \text{ м/с}. \end{aligned} \right\} \quad (2.73, a)$$

На рис. 2.73 воспроизведены экспериментальные данные испытания исходного (стандартного) бетона, при переменном времени уплотнения. Результаты осредняются расчетной кривой

$$R_{tt} = 0,5e^{0,97v}, \quad (2.74)$$

которая получена путем подстановки (2.73) в (2.72).

Постоянные  $C$  и  $d$  имеют размерность

$$[C] = \text{кгс/см}^2; \quad (2.75)$$

$$[d] = \text{с/км}. \quad (2.76)$$

Следует отметить, что результаты, приведенные на рис. 2.73, имеют небольшой разброс.

Если сравнить коэффициенты  $C$  и  $d$  из формулы (2.72) с коэффициентами  $a$  и  $b$  аналогичного соотношения для прочности при сжатии (2.58), можем констатировать:

$$C \approx \frac{a}{5}; \quad (2.77)$$

$$e^{dv} \approx \frac{1}{2} e^{bv}. \quad (2.78)$$

Коэффициенты влияния в качественном отношении здесь такие же, как и для прочности при сжатии. Однако значения коэффициентов влияния имеют особенности. Так, например, к коэффициенту влияния свойств цемента, равному единице, относится цемент марки P500 (на сжатие этот цемент соответствует коэффициенту влияния выше единицы) вместо исключенного цемента T25, у которого коэффициент влияния ниже единицы (на сжатие был равным единице). Эта особенность представлена на рис. 2.74 и в табл. 2.17.

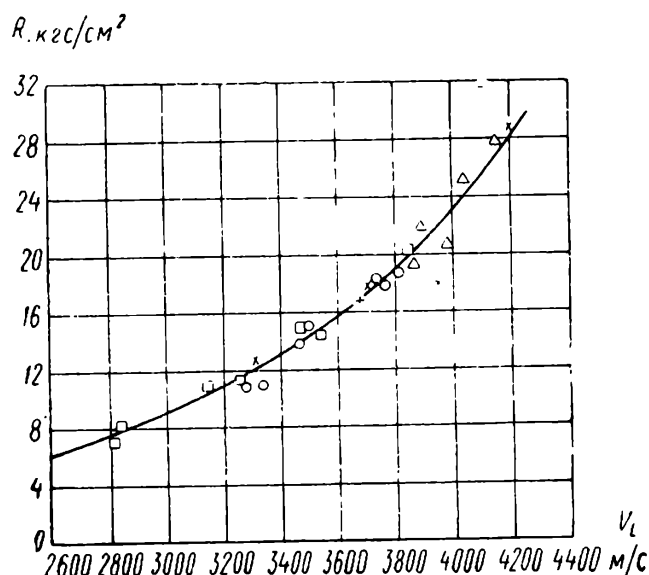


Рис. 2.73. Зависимость «скорость — прочность на растяжение при изгибе» для стандартного бетона с различным временем вибрирования

○ — 50 с; □ — 30 с; △ — 20 с; + — 10 с; × — 0 с

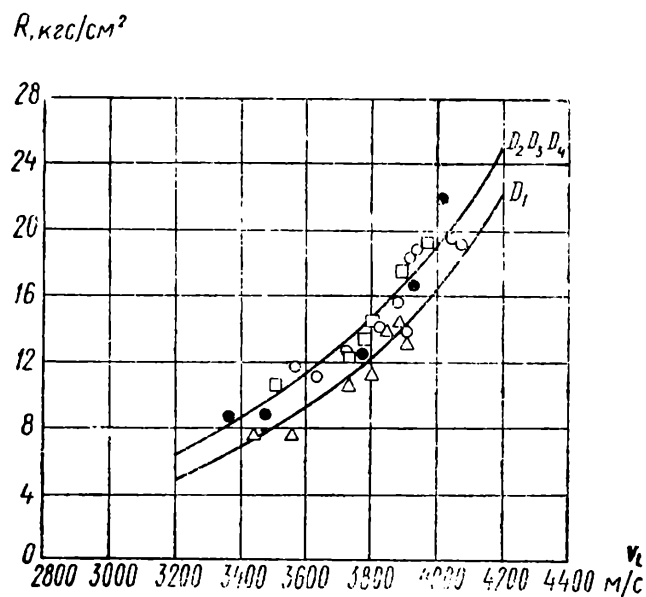


Рис. 2.74. Влияние вида цемента на зависимость  $R_{tt} - v_L$

△  $D_1$  — цемент T25; □  $D_2$  — цемент M400; ○  $D_3$  — цемент P500; ●  $D_4$  — цемент P300

Влияние дозировки в сравнении с прочностью на сжатие менее заметно. Значения коэффициентов влияния дозировки приведены в табл. 2.18.

Таблица 2.17. Влияние свойств цемента

Цемент	Коэффициент влияния $C_c$
P500, P400, P300, M400	1
T25	0,85

Таблица 2.18 Влияние дозировки цемента

Дозировка цемента в кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент влияния $C_d$	Дозировка цемента в кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент влияния $C_d$
200	0,88	350	1,06
250	0,94	400	1,12
300	1	450	1,18

Снижение влияния этого параметра объясняется тем, что прочность на растяжение меньше, чем прочность при сжатии, зависит от дозировки цемента.

Относительно влияния зернового состава существующие экспериментальные данные [29] показали, что оно сильнее по сравнению с прочностью при сжатии. Коэффициент влияния количества мелкой фракции (0—1 мм) заполнителя приведен в табл. 2.19.

Таблица 2.19. Влияние мелких фракций заполнителя

Мелкая фракция (0—1 мм) в %	Коэффициент влияния $C_g$	Мелкая фракция (0—1 мм) в %	Коэффициент влияния $C_g$
6	0,88	30	1,38
12	1	46	1,7
18	1,12		

Увеличение влияния зернового состава заполнителя определяется той ролью, которую играет увеличение удельной поверхности заполнителя при явлении разрыва при растяжении по отношению к разрушению от сжатия. В отношении остальных факторов, касающихся состава бетона и хранения его, не установлено каких-либо качественных отличий значений коэффициентов влияния, полученных на основании специальных исследований. Если эти факторы не известны, то рекомендуется принять в качестве первого приближения значения коэффициентов влияния, установленные для случая прочности при сжатии. Возникающие ошибки невелики, если коэффициенты не очень отличаются от таковых для исходного (стандартного) бетона.

Для перехода от исходного (стандартного) бетона к реальному составу вычисляется общий коэффициент влияния  $C_t$  из формулы:

$$C_t = C_c C_d C_a C_g C_{\phi} C_m C_u C_p. \quad (2.79)$$

Затем определяется прочность в характерных точках с помощью зависимости  $R_{ti} - v_L$  и умножается на этот общий коэффициент  $C_t$ , после это-

го определяют постоянные  $c$  и  $d$  и снова определяют новую кривую, используя следующие условия:

$$\left. \begin{aligned} R_{ti}^{(1) \text{ эксп}} &= R_{ti}^{(1) \text{ станд}} C_t; \\ v_1 &= 3200 \text{ м/с}; \end{aligned} \right\} \quad (2.80)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{ti}^{(2) \text{ эксп}} &= R_{ti}^{(2) \text{ станд}} C_t; \\ v_2 &= 4200 \text{ м/с}. \end{aligned} \right\} \quad (2.80, \text{а}^*)$$

Для облегчения вычислений по табл. 2.20 можно получить непосредственно значение прочности, соответственное различным скоростям распространения для бетонов, характеризующихся общим коэффициентом влияния, величина которого находится между 0,6 и 1,5.

Таблица 2.20. Прочность на растяжение при изгибе бетона для различных коэффициентов  $C_t$

$V_L, \text{ м/с}$	Прочность на растяжение при изгибе $R_{ti}$ $\left( W = \frac{1}{3,5} bh^2 \right)$ для значений $C_t, \text{ кгс/см}^2$									
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
3000	5,5	6,4	7,4	8,3	9,2	10,1	11	12	12,9	13,8
3100	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3200	6,6	7,7	8,8	9,9	11	12,1	13,2	14,3	15,4	16,5
3300	7,3	8,5	9,8	11	12,2	13,4	14,6	15,8	17,1	18,3
3400	8	9,4	10,8	12,1	13,4	14,7	16,1	17,4	18,8	20,1
3500	8,9	10,4	11,9	13,3	14,8	16,3	17,8	19,3	20,3	22,2
3600	9,7	11,3	13	14,6	16,2	17,8	19,4	21,1	22,7	24,3
3700	10,7	12,5	14,2	16	17,8	19,6	21,4	23,1	24,9	26,7
3800	11,6	13,6	15,5	17,5	19,4	21,3	23,3	25,2	27,2	29,1
3900	12,7	14,8	17	19,1	21,2	23,3	25,4	27,5	29,7	31,8
4000	14	16,4	18,7	21,1	23,4	25,7	28,1	30,4	30,7	35,1
4100	15,6	18,2	20,8	23,4	26	28,6	31,3	33,8	36,5	39
4200	17,3	20,1	23,1	25,9	29,8	31,7	34,6	37,5	40,3	43,2
4300	19,1	22,3	25,5	28,6	31,8	35	38,1	41,3	44,5	47,7
4400	21	24,5	28	31,5	35	38,5	42	45,5	49	52,5
4500	22,9	26,7	30,5	34,3	38,2	42	45	49,7	53,5	57,3
4600	25,5	29,7	33,9	38,2	42,4	46,6	50,8	55,1	55,3	63,6

Скорости распространения, приведенные в настоящем разделе, измерялись на призме  $10 \times 10 \times 55 \text{ см}$  для продольных волн с расположением в торцах преобразователя с собственной частотой около  $40 \text{ кгц}$ . Измерения были выполнены в условиях, приблизительно одинаковых с эластометром RECO (собственная частота  $46 \text{ кгц}$ ). Результаты измерений, выполненные с помощью преобразователей с разными частотами для введения поправки на физическую и структурную дисперсию скорости распространения ультразвука в элементах ограниченных размеров, в настоящем разделе не были использованы.

\* Обозначения в (2.80, а) и (2.80) аналогичны обозначениям в формулах (2.64, а) и (2.64) (примеч. науч. ред.).



Точность определения прочности на растяжение при изгибе с помощью измерения скорости распространения сопоставима с соответствующей точностью по прочности при сжатии (см. раздел 2.5.10.11).

Имеется возможность для повышения точности определения прочности бетона с помощью прямого тарирования испытываемых образцов и проб: изменением состава бетона, способов уплотнения, хранения и твердения, кроме того, имеется и соответствующая методология проведения испытаний, аналогичных с теми, которые изложены в разделе 2.5.10.10 при определении прочности на сжатие.

### **2.5.12. Связь между затуханием и прочностью при сжатии**

Затухание импульса является второй характеристикой кроме скорости распространения, которая может быть измерена с помощью неразрушающего ультразвукового метода испытания. Принцип и техника измерений были изложены в разделе 2.4.5.2.

В первоначальных исследованиях в отношении затухания ультразвукового импульса в бетоне был проявлен большой оптимизм, поскольку предполагалось, что изменение затухания зависит в основном от вязкопластических свойств материала, которые играют важную роль в разрушении бетона. Первоначальный оптимизм был, однако, рассеян довольно скромными результатами экспериментов.

В INCERC [41] были выполнены исследования в связи с изучением влияния свойств цемента с проведением измерения затухания, которые не дали ничего нового по сравнению со скоростями распространения ультразвука (рис. 2.75). Из графика видно, что в сравнении с классической группой портландцементов, например, применение быстросхватывающегося цемента R1M приводит к получению более высокой прочности при одинаковом затухании, но применение цементов с добавками снижает прочность при том же затухании, как, например, для цемента типа F.

Использование затухания для оценки относительного влияния дозировки цемента не является улучшением по сравнению с измерениями скорости распространения. Чем больше расход цемента (рис. 2.76), тем больше затухание при одной и той же прочности бетона. Влияние зернового состава заполнителя при измерении затухания обнаруживается двояко: через влияние максимального размера заполнителя и его мелких фракций, что взаимно связано между собой.

В INCERC (рис. 2.77) были проведены исследования влияния максимального размера заполнителя, которые показали, что прочность бетона, соответствующая определенному уровню затухания, тем больше, чем больше размер заполнителя. До тех пор пока измерение затухания производится изолированно, установление такого факта не предоставляет никакого преимущества в отношении измерения скорости распространения ультразвука, где было отмечено обратное влияние: чем больше был размер заполнителя, тем прочность бетона, соответствующая данной скорости распространения, меньше. Однако именно вследствие различного влияния максимального размера заполнителя на затухание и скорость появляется возможность исключить нежелательное

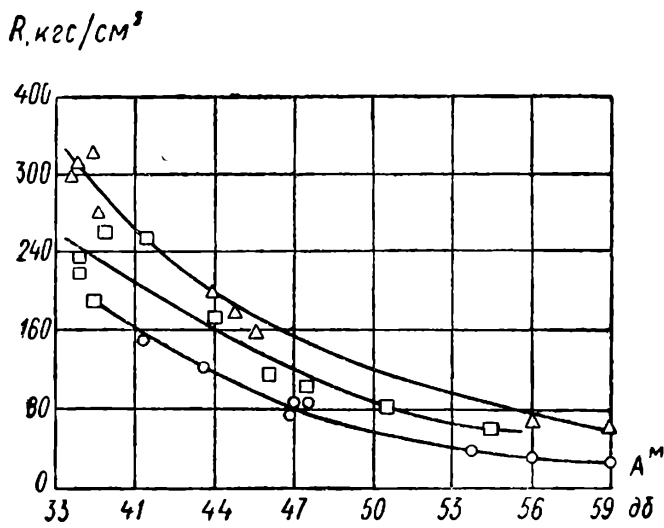


Рис. 2.75. Влияние вида цемента на соотношение  $R-A$   
 $\Delta$  — цемент RIM;  $\square$  — цемент P;  $\circ$  — цемент F

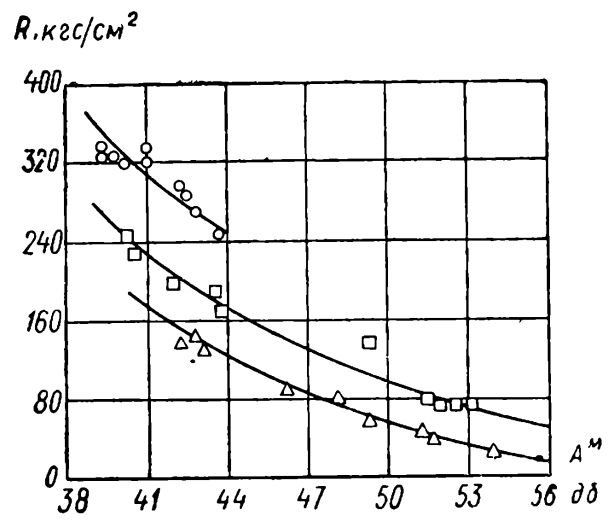


Рис. 2.76. Влияние дозировки на соотношение  $R-A$   
 $\circ$  — 400 кг/м³;  $\square$  — 300 кг/м³;  $\Delta$  — 200 кг/м³

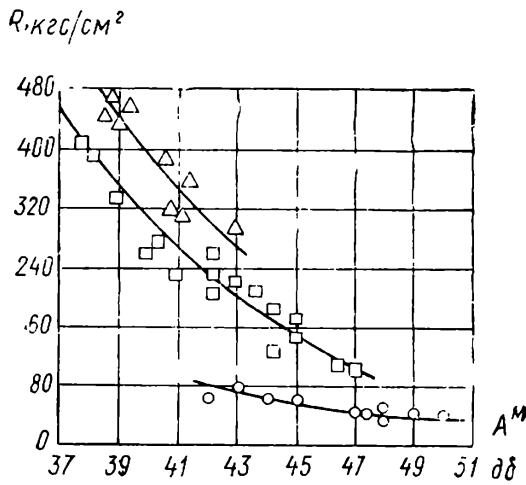


Рис. 2.77. Влияние максимальных размеров заполнителя на соотношение  $R-A$   
 $\Delta$  —  $\varnothing$  макс = 70 мм;  $\square$  —  $\varnothing$  макс = 7 ÷ 30 мм;  
 $\circ$  —  $\varnothing$  макс = 1 мм

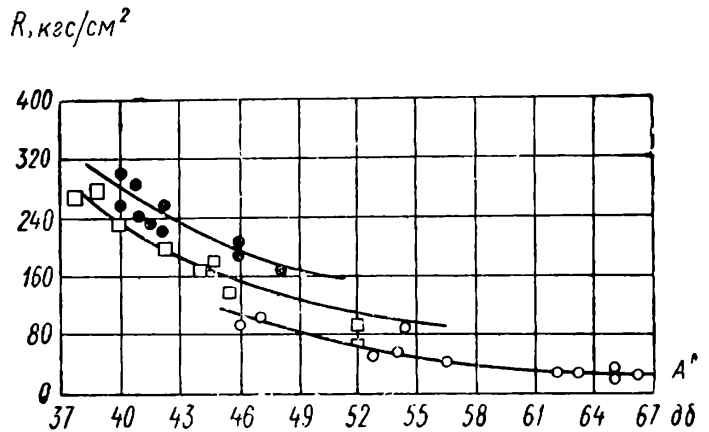


Рис. 2.78. Влияние мелких фракций на соотношение  $R-A$   
 $\bullet$  — крупный зерновой состав;  $\square$  — средний зерновой состав;  $\circ$  — мелкий зерновой состав

влияние размеров заполнителя при проведении одновременно измерений скорости и затухания для определения прочности бетона.

Аналогично предыдущему возникает такое же положение с влиянием количества мелких фракций заполнителя (0—1 мм) (другой параметр, который вместе с максимальным размером характеризует зерновой состав заполнителя). На рис. 2.78 представлены результаты, полученные на основании испытания бетонов различного зернового состава для исследования влияния количества мелких фракций на затухание ультразвука. График показывает, что для одного и того же затухания прочность бетона тем больше, чем беднее мелкими фракциями зерновой состав заполнителя. По этим данным влияние зернового состава прямо противоположно установленному ранее для зависимостей «скорость — прочность». Сочетание измерений ско-

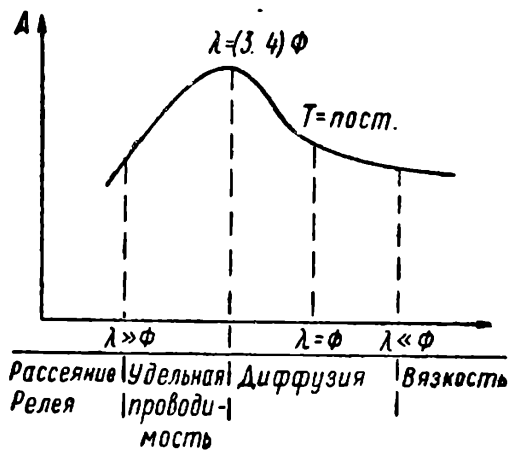


Рис. 2.79. Затухание ультразвука в поликристаллических телах

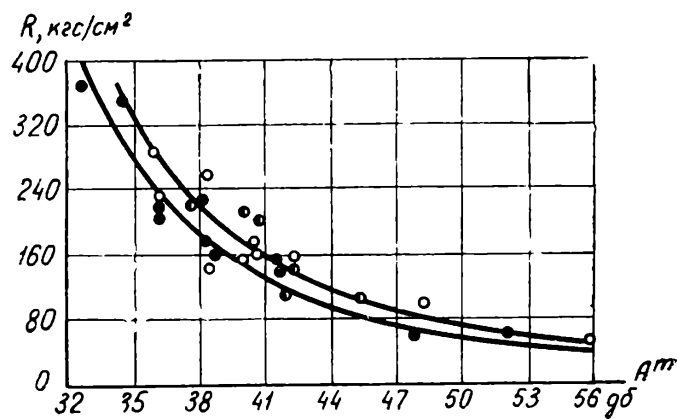


Рис. 2.80. Влияние влажности бетона на соотношение  $R-A$

○ — в воздухе; ● — в воде; ◐ — в воде + воздухе

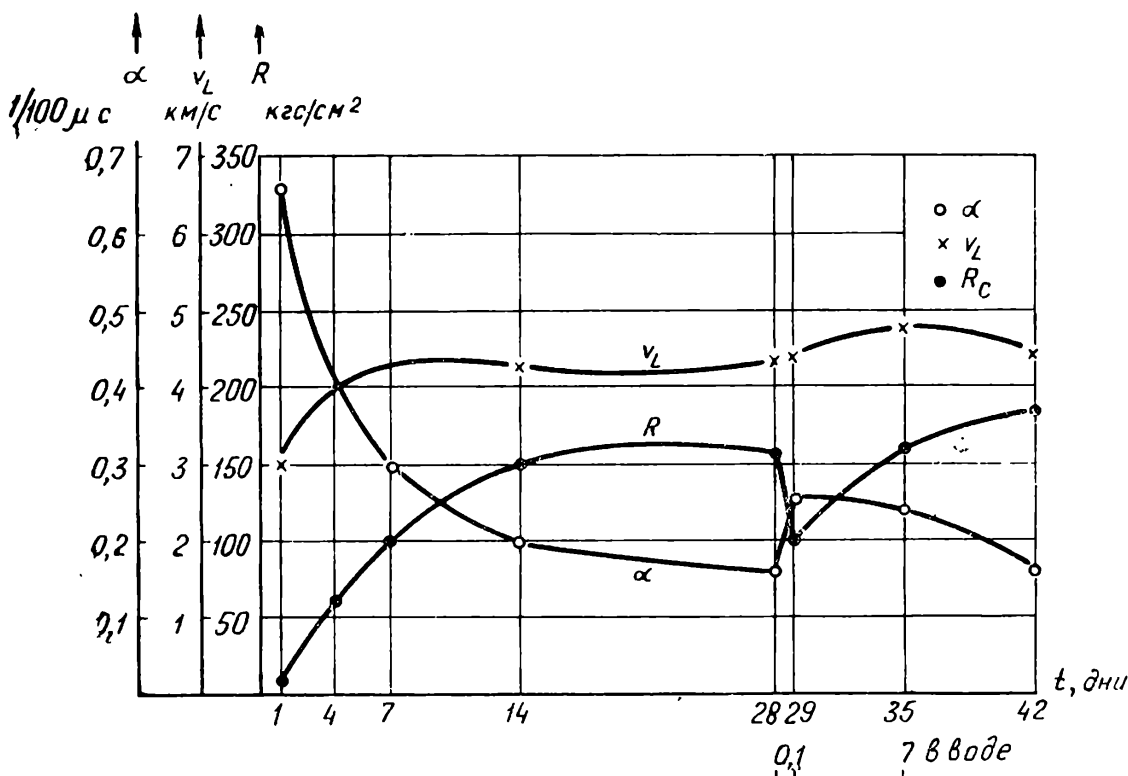


Рис. 2.81. Влияние возраста и влажности бетона на скорость ( $v_L$ ), коэффициент затухания ( $\alpha$ ) и прочность бетона ( $R$ )

рости распространения ультразвука и затухания предусматривается для учета влияния количества мелких фракций заполнителя на соотношение между величинами, полученными неразрушающим методом, и прочностью бетона.

Необходимо попытаться вкратце объяснить физический смысл влияния зернового состава заполнителя, имея различные результаты в случае измерения затухания и скорости распространения ультразвука. Как известно, поглощение ультразвука в поликристаллическом материале изменяется в зависимости от размера диаметра частицы и представлено в виде кривой, приведенной на рис. 2.79. Если частицу заполнителя приравнять к кристаллу в составе поликристаллического тела, то придем к выводу, что в области частот, с которыми проводят испытания обычного бетона, максимальное затухание имеет место при следующих размерах частиц:

$$\Phi = \frac{\lambda}{3-4} = 10-30 \text{ мм}, \quad (2.81)$$

т. е. как раз в области крупных частиц. Так как частицы заполнителя в общем меньше, чем эти размеры, то поглощение в бетоне находится в области подъема ветви кривой на рис. 2.79, и, следовательно, частицы меньшего размера вызывают затухание значительно меньше, чем крупные.

Последний параметр влияния — влажность бетона. Что касается влияния этого параметра, то результаты получены разные в зависимости от техники измерения, поэтому они довольно противоречивы. Так, испытания, выполненные в INCERC путем техники измерения амплитуды переднего фронта волны, показали, что влажность бетона оказывает очень незначительное влияние на соотношение «затухание — прочность» (рис. 2.80). Испытания прочности с использованием импульсной техники измерения скорости и затухания выполнил Галан [23], который (рис. 2.81) показал, что твердение бетона на воздухе приводит к значительному затуханию в первые дни, затем оно остается примерно постоянным и отличается незначительным снижением в дальнейшем. Из рис. 2.81 видно, что бетон набирает прочность с первых дней, а затем она снижается после однодневного хранения в воде, но после 6 суток хранения в воде прочность бетона снова начинает увеличиваться и достигает уровня, который был до погружения в воду.

Между выводами двух исследований существует разница, которая возникла в результате неудовлетворительно поставленных испытаний, поэтому измерение затухания должно быть улучшено, а определение прочности бетона должно проводиться с учетом различной влажности.

Описанная методика измерения затухания не предполагает определения прочности бетона в сооружении, что вызвано экспериментальными трудностями, но в этой области существует благоприятная перспектива, связанная с применением комбинированных способов измерения затухания и скорости распространения ультразвука, а также в комбинации с другими неразрушающими методами (см. гл. 7).

### 2.5.13. Контроль качества забивных свай

Контроль качества свай — важная практическая проблема, и мы снова встречаемся с применением акустического метода, разновидность которого рассмотрена в гл. 1. В настоящем разделе дается более подробное изложение решения задачи, чем в разделе 1.7.10, благодаря трудам Ж. Пакэ [42] и Г. Бриярда.

Принцип метода простой. Вертикальным ударом, который наносится непосредственно по верхушке сваи, посылают сигнал в виде импульса. Сигнал распространяется вниз вдоль сваи и отражаясь вновь возвращается к вершине сваи с искажением, если встречается препятствие (рис. 2.82). Этот метод до известной степени аналогичен методу, который применяется для проверки металла с помощью отраженного импульса<sup>1</sup>. Для применения описанного метода следует учитывать следующее: состояние верха головы сваи,

<sup>1</sup> Эхо — импульсный метод (примеч. науч. ред.).

где происходит наибольшее затухание импульса в трещиноватом бетоне, и потерю энергии ввиду излучения в окружающий грунт. В зависимости от перечисленных условий применяют в качестве источника упругих волн пьезоэлектрический или же магнитострикционный излучатель. Энергия, которая необходима для работы установки, должна быть большой, поэтому возможно использование механического импульса, полученного от удара молотком. Идеальным было бы создание источника волны с площадью, равной поверхности верхушки сваи. Но, по практическим соображениям, от выполнения такого решения приходится отказаться и передачу импульса бетону производить посредством металлического диска диаметром 30 мм, следовательно, приблизительно точечной передачей. Диск закладывают в бетон при изготовлении сваи вместе с четырьмя приемниками колебаний типа миниатюрного сейсмографа (Hall Seaws H. S. J.) с собственной частотой 20 гц, которая обеспечивает электрическое напряжение, пропорциональное скорости перемещения. Применение механического молотка предпочтительнее по сравнению с пьезоэлектрическим излучателем, так как первый допускает с помощью очень короткого сигнала отмечать на экране осциллоскопа момент нанесения удара.

Одновременно с отметкой посылки сигнала на экране осциллоскопа приемником-сейсмографом измеряется скорость смещения в момент удара. Отражение, возникшее после распространения упругой волны вдоль сваи в одном направлении, а затем в обратном, затухает в 20—50 раз, поэтому его усиливают. Для того чтобы не исчез первый сигнал, а также чтобы его не перекрыл отраженный сигнал, применяется экспоненциальный усилитель. Наконец, после прохождения фильтра высоких частот благодаря резонансу верхушки сваи сигнал отмечается на осциллоскопе с запоминающим устройством и затем фотографируется.

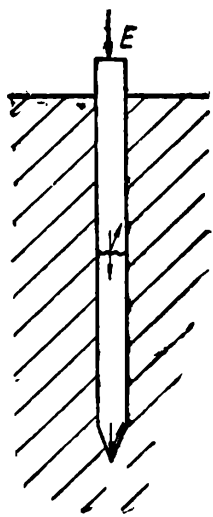
Приемная цепь состоит из:

- 1) контура смещения сигнала;
- 2) корректирующего фильтра, который обеспечивает развертывание сигнала;
- 3) экспоненциального усилителя на транзисторе, играющем роль переменного сопротивления. Увеличение уровня усиления является регулируемым;
- 4) фильтра низких частот.

Метод был проверен экспериментальным путем на большом количестве свай и позволил безошибочно обнаружить разрушение для свай длиной от 0 до 15 м. Трудности, которые возникали иногда, следующие:

сваи «без дна», в которых не возникало отражение. В этом случае не представляется возможным утверждать о разрушении вблизи глубины заложения;

сваи «резонансные». От указанных свай возникает резонанс, который преодолевает ударный импульс и препятствует различению отражения, возникшего в результате разрушения сваи, от отражения с глубины заложения.



← Рис. 2.82. Применение импульсного метода для свай

## 2.5.14. Определение однородности качества бетона

Развитие статистических методов расчета элементов из бетона, железобетона и предварительно-напряженного бетона определяет большое значение оценки однородности качества бетона, уложенного в дело. Классическим методом проведения работы по определению однородности качества бетона было извлечение образцов из существующей конструкции и испытание на прессе на сжатие до разрушения.

Однако этот метод связан с рядом затруднений, к которым относятся небольшое количество образцов; большая разница между уплотнением бетона для приготовления образца и аналогичного бетона при укладке в дело, когда имеются различия в зависимости от армирования, геометрических размеров и пр.; разница в условиях твердения бетона (температура, быстрота потери воды и пр.), укладываемого в дело и в образце.

Ко всем этим расхождениям добавляются случайные, поэтому оправдан тот интерес, который проявляется к использованию ультразвукового метода в решении этой проблемы. Неразрушающий ультразвуковой метод не имеет тех недостатков, которые присущи обычным механическим методам испытания, когда испытания связаны с разрушением образцов.

Необходимо уточнить и некоторые недостатки, присущие ультразвуковому импульсному методу:

отмечается недостаточная чувствительность к изменениям прочности благодаря изменениям дозировки цемента;

однородность, полученная на основании неразрушающих испытаний, зависит от длины траектории импульса в бетоне.

Таким образом, как самостоятельный метод он не имеет преимуществ и пригоден только в качестве полумеры. Этот метод более эффективен в комбинированном применении, когда снижается влияние дозировки цемента на окончательные результаты. В отношении второго замечания вопрос разрешается путем применения разного рода поправок, которые вводят в виде поправочных коэффициентов в окончательные результаты на основании специально проведенных опытов.

Действительно, выполняя измерения на одном и том же массиве бетона, однако на разных расстояниях между излучателем и приемником, в результате получают неодинаковые величины скоростей. На рис. 2.83 представлены поправочные коэффициенты на изменение скорости распространения в зависимости от расстояний излучателя от приемника для бетона, сохраняемого на открытом воздухе или в воде, в котором принят максимальный диаметр заполнителя 30 мм. Из графика видно, что для одного и того же состава бетона полученные результаты мало зависят от размера базы при расстояниях около 30—40 см\*.

На практике, принимая во внимание размеры и форму элемента, возникает необходимость производить измерения для разных расстояний между преобразователями, в том числе и во много раз меньших, чем рекоменду-

---

\* В работе Филонидова А. М., Третьякова А. К. «Контроль бетона ультразвуком в гидротехническом строительстве» (М., «Энергия», 1969) приведены данные по коэффициентам приведения скоростей ультразвука для разных баз и частот (примеч. науч. ред.).

емые минимальные размеры. Возникает вопрос, как следует расценивать эти результаты? Каким образом можно проводить сопоставления с однородностью бетона, когда за основу приняты испытания образцов-кубов?

Следует подчеркнуть с самого начала, что определение однородности бетона, уложенного в конструкции с помощью неразрушающего метода, — это новая проблема. Не ясно, нужно ли для установления однородности производить индивидуальные или групповые измерения, производить определение однородности бетона по всему сечению или в какой-либо части всего элемента? Ответ зависит от типа элемента и требований, которые ему предъявляются.

Проведение испытания колонны, работающей под центрально приложенной нагрузкой или нагрузкой с небольшим эксцентриситетом, обязывает проверить бетон по всему элементу и оперировать средними значениями по сечению.

Совершенно иное положение создается в отношении однородности качества бетона в балках. В этом случае интерес представляют измерения в сжатой зоне на участке максимального момента.

Для плиты измерения возможны только на поверхности, и их нужно выполнять на лицевой стороне, соответствующей сжатой зоне.

Когда необходимо согласовать сведения, касающиеся однородности бетона, полученные неразрушающим методом, с результатами, полученными обычным методом на образцах, необходимо преобразовать данные измерений на разных длинах, отличающихся между собой, и сопоставить их с результатами, полученными на основе куба-эталона. В качестве эталона принимается куб со стороной 20 см, следовательно, все приводится к базе 20 см.

Преобразование коэффициента изменчивости скорости при расстоянии прозвучивания  $x$  к результату на базе эталона, равного 20 см, производится согласно уравнению

$$C_v^{20} = mC_v^x, \quad (2.82)$$

в котором значения коэффициента  $m$  для бетона с заполнителем, максимальный размер которого находится в пределах 15—30 мм, приводится в табл. 2.21.

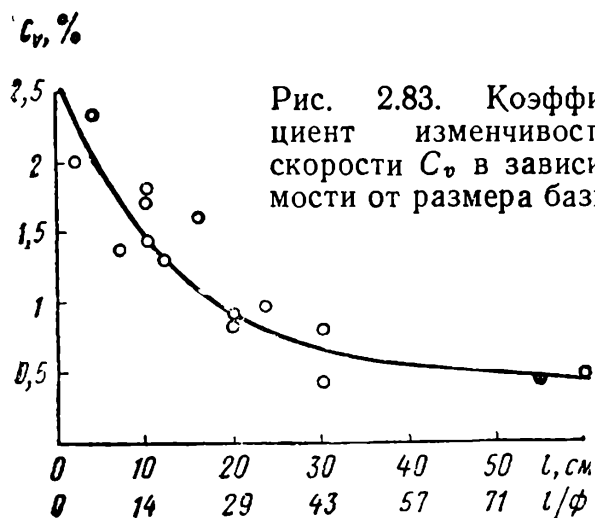


Таблица 2.21. Значения коэффициента  $m$

Основание в см	Коэффициент $m$
5	0,45
10	0,6
15	0,8
20	1
30	1,4
40	1,7
50	1,9
60	2

Для получения коэффициента изменчивости прочности  $C_v^R$  из коэффициента изменчивости скорости распространения  $C_v^v$  можно использовать уравнение (2.83), основанное на четырехкратном отношении скорости к прочности [27]:

$$C_v^R \approx 4C_v^v * . \quad (2.83)$$

Если имеется тарировочная кривая, тогда можно дать следующие рекомендации по результатам испытаний, выполненных на расстояниях, которые не требуют внесения исправлений по (2.82):

преобразовывают измеренную скорость распространения в прочность бетона на основе использования системы коэффициентов влияния, предусмотренных в пп. 2.5.10.10;

вычисляют среднее значение прочности для одного состава бетона по уравнению

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} , \quad (2.84)$$

где  $R_i$  — прочность, измеренная в  $i$ -том образце или в  $i$ -том сечении;  $n$  — количество измерений или поперечных сечений, взятых в расчет;

вычисляют абсолютную величину отклонения  $\varepsilon_i$  каждого измерения из выражения

$$\varepsilon_i = R_i - \bar{R}; \quad (2.85)$$

вычисляют среднеквадратичное отклонение прочности  $S$  из уравнения

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n-1}} ; \quad (2.86)$$

вычисляют коэффициент изменчивости прочности  $C_v^R$  согласно уравнению

$$C_v^R = \frac{S}{\bar{R}} 100 \% ; \quad (2.87)$$

вычисляют минимально вероятную (расчетную) прочностную характеристику, соответствующую заданному уровню обеспеченности, из уравнения

$$R_{\text{расч}} = \bar{R} (1 - t C_v^R) ** . \quad (2.88)$$

\* Уравнение (2.83) проверено экспериментально и не подтверждается.  $C_v^R = (1,10 - 1,35) C_v^v$ . См. Почтовик Г. Я., Филонидов А. М., Ваславский В. Ф. Определение однородности бетона помощью ультразвука. «Энергетическое строительство», 1968, № 5(примеч. науч. ред.).

\*\* Формула (2.88) аналогична предложенной В. А. Клевцовым в 1969 г. на основании развития положений ГОСТ 10180—67 и ГОСТ 8829—66. См. Клевцов В. А. Об оценке прочности бетона при испытании конструкций неразрушающими методами. «Бетон и железобетон», 1969, № 7 (примеч. науч. ред.).



Коэффициент  $t$  определяется в зависимости от количества измерений в одной и той же совокупности при заданной обеспеченности. Под заданной обеспеченностью подразумевают, что прочность, которая определяется данным методом, достоверна в указанных пределах.

Значения коэффициента  $t$  для уровней обеспеченности 0,95 и 0,9 приведены в табл. 2.22.

Т а б л и ц а 2.22. Значение коэффициента  $t$

Количество измерений	Заданный уровень обеспеченности		Количество измерений	Заданный уровень обеспеченности	
	0,95	0,9		0,95	0,9
1	6,31	3,08	8	1,86	1,4
2	2,92	1,87	10	1,81	1,37
3	2,35	1,64	15	1,75	1,34
4	2,13	1,53	20	1,72	1,32
5	2,02	1,48	30	1,7	1,3
6	1,94	1,44	35	1,65	1,28

На основании минимальной вероятной прочностной характеристики можно вычислить коэффициент однородности  $K_b$  согласно уравнению

$$K_b = \frac{R_{расч}}{M}, \quad (2.89)$$

в котором  $M$  — проектная марка бетона.

Если получено распределение с положительной асимметрией на основании не менее чем 70 испытаний и коэффициент изменчивости  $C_v^R > 12\%$ , значение коэффициента однородности, приведенное в формуле (2.89), может быть в большинстве случаев определено с помощью значения  $K_a$  согласно уравнению

$$K_a = \beta K_b, \quad (2.90)$$

в котором коэффициент  $\beta > 1$  приведен в табл. 2.23.

Т а б л и ц а 2.23. Значение коэффициента  $\beta$

$A_s/C_v^R$ \ $C_v^R, \%$	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5	3
12	1	1	1	1	1	1	1
15	1,02	1,06	1,09	1,14	1,18	1,23	1,31
20	1,07	1,14	1,21	1,28	1,35	1,45	1,53
25	1,3	1,42	1,58	1,76	1,92	2,01	2,18
30	2,4	2,8	3,2	3,8	4,3	4,75	5,1

Коэффициент асимметрии  $A_s$ , который приводится в табл. 2.23, вычисляется по уравнению

$$A_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^3}{nS^3} . \quad (2.91)$$

В зависимости от значений, полученных для коэффициента  $K$ , однородность бетона оценивается в соответствии с табл. 2.24.

Таблица 2.24. Однородность бетона

Значение коэффициента $K$	Качество бетона
$> 0,85$	Хорошее
$0,7 - 0,85$	Среднее
$< 0,7$	Плохое

Значения, приведенные в таблице, являются более высокими, чем полученные с помощью механических разрушающих методов, поскольку измерения скорости распространения не чувствительны ко всем факторам, которые создают изменения прочности бетона.

### 2.5.15. Контроль качества бетона в сборных элементах

Контроль качества бетона в сборных элементах с помощью ультразвукового импульсного метода производится с учетом следующих данных, а именно:

1) какие типы сборных элементов подлежат контролю с помощью применения ультразвукового неразрушающего метода?

2) какие марки бетона и арматурной стали применяются для изготовления элементов [43]?

3) какие способы обработки применяются для ускорения твердения применяемого бетона [44, 45]?

4) какие условия хранения после формования и какие сроки предусматриваются для определения прочности бетона?

5) какие факторы вызывают изменения качества бетона в элементе?

Фактически наиболее важной проблемой является последняя, поскольку решается вопрос о возможности применения ультразвукового импульсного метода [46]. Если уплотнение бетона и отношение  $V/C$  в бетонной смеси оптимальны, тогда можно рассчитывать на благоприятные результаты. Если пренебречь возможностью изменения зернового состава заполнителей и считать возможными отступления в режиме термической обработки, ситуация в отношении применения ультразвукового метода еще довольно благоприятна, но существует риск случайных преувеличений, правда не слишком больших. Возможно занижение прочности из-за присутствия в зерновом составе мелких фракций заполнителя или же из-за слишком жесткой термообработки. Если же причиной изменения прочности бетона в элементе явля-

ется изменение дозировки цемента, то применение ультразвукового импульсного метода исключается.

Ответ на вопрос, содержащийся во 2-м пункте, определяется критериями, не связанными с применением ультразвукового метода.

Если необходимо испытать бетон, марка которого равна или превышает 400, ультразвуковой метод следует исключить.

В соответствии с пп. 1 и 2 необходимо уточнить размеры и количество применяемых образцов и построить тарировочные кривые. Если элементы, которые необходимо испытать, относительно массивные и минимальные толщины не менее 15—20 см, нужно применить в испытаниях для тарировки кубы со стороной 20 см. Для выполнения этой работы следует применить преобразователи с пониженной собственной частотой около 40 кГц и обеспечить достаточную точность измерения скорости распространения. Если испытываемые элементы имеют минимальные размеры — в пределах 10—15 см, это указывает на необходимость применения образцов-кубов со стороной 15 см, но в этом случае является обязательным применение преобразователей с собственной частотой, по крайней мере 60 кГц (см. раздел 2.5.1). Применение кубов со стороной 10 см в качестве эталона не рекомендуется.

Ответом на вопросы, содержащиеся в пп. 2 и 4, является необходимость построения нескольких тарировочных кривых. В принципе, для каждой марки или состава бетона, а также для каждого типа сборного элемента необходимо строить тарировочную кривую. К сборным элементам, подлежащим испытанию ультразвуком, предъявляются два условия: они должны быть распалубленными и должен быть известен возраст бетона. Для элементов, предназначенных к поставке в промежутке 14—28 суток после изготовления, можно применить тарировочную кривую, построенную для среднего количества суток, т. е. для 21 суток.

Одна тарировочная кривая строится для 15—30 образцов, сгруппированных в серии по 3 шт. Одна серия от другой отличается параметрами, которые отражают такие изменения качества бетона, которые характерны для элемента. Если количество параметров велико и учесть их трудно, изменяют степень уплотнения или водоцементное отношение.

После изготовления серий образцов они подвергаются такому же режиму твердения и хранения, что и бетон из элемента. Очень продолжительная термообработка может привести к образованию внутренних микротрещин в бетоне и в этом случае применение ультразвукового метода приводит к ошибкам.

При выборе направления испытания ультразвуком необходимо избегать направления, совпадающего с направлением продольной арматуры, а также зон с частым расположением арматуры (см. раздел 2.5.3). Необходимо также, чтобы точки испытания не были расположены со стороны поверхности укладки материала при изготовлении или вблизи этого места, если это возможно. Испытания рекомендуется проводить с помощью сквозного прозвучивания (см. раздел 2.4.5) и только в исключительных случаях, при отсутствии других решений, проводятся испытания поверхностным методом (раздел 2.4.5). Если в этом случае имеется возможность выбора мест испытания между поверхностью укладки материала и боковой поверхностью, предпочитается последняя. Чтобы исключить возможное влияние хо-

мутов на измерения, рекомендуется размещать точки испытания посередине расстояния между хомутами. Расположение хомутов определяется с помощью магнитного прибора (см. гл. 6).

Зона испытания в элементе может быть выбрана на основании двух критериев [48]:

«опасное» сечение с максимальной нагрузкой; имеется главным образом в балках, плитах и колоннах, подвергнутых действию максимального момента;

самое нижнее сечение; относится главным образом к сборным колоннам, подвергнутым действию центральной или внецентренно приложенной сжимающей нагрузки с небольшим эксцентриситетом.

Количество точек испытания на одном элементе для сборных конструкций — не менее 10—12.

Всякий раз, когда изменяется рецептура приготовления бетона в заводских условиях, необходимо вновь производить тарирование. Также через каждые две недели из текущей продукции завода производится отбор проб бетона для изготовления образцов-кубов с целью проведения контроля тарировочной кривой. Если результаты, полученные при испытании кубов неразрушающим и разрушающим способами, отличаются не более чем на  $\pm 15\%$ , то эти результаты считаются пригодными. Если погрешность больше, то строят новую тарировочную кривую.

Точность определения прочности бетона ультразвуковым импульсным методом в сборных элементах должна находиться в пределах  $\pm 15—25\%$ . Следует обратить особое внимание на случаи, в которых возможны грубые ошибки, и не применять ультразвуковой метод контроля свойств бетона [49].

### 2.5.16. Контроль качества бетона на строительстве

В Румынии довольно часто для контроля качества бетона на стройплощадке применяется ультразвуковой импульсный метод. Поскольку бетонирование является необратимым процессом, который чувствителен ко всем колебаниям качественных характеристик в этом процессе, контроль за приготовлением и укладкой бетона в сооружение обычно слабее, чем на заводе; кроме того, условия твердения монолитного бетона могут изменяться больше и быть более жесткими, чем на заводе.

Контроль качества бетона на строительстве предлагается осуществлять по следующим этапам.

1. Необходимо наиболее точно определять границы зон, которые следует проверять. Эта процедура выполняется по требованию или с участием испытателей, а также в случае необходимости с проектировщиками. Внимательное и точное установление зон облегчает контроль, допуская тем самым снижение объема испытаний за счет концентрации усилий на ограниченной зоне.

2. Более детальное обоснование причин, по которым исключается проверка тех или иных зон. В отдельных случаях имеется простое пожелание по проверке самого метода. В других случаях имеются очевидные причины, из-за которых возникают сомнения в отношении качества бетона.

Что касается первой проблемы и ее осуществления, то подробные дан-

ные были приведены в предыдущем разделе (см. раздел 2.5.15). Следует напомнить, что ультразвуковые методы более эффективно применяются на строительстве, нежели на заводе сборных конструкций, несмотря на то что обычно состав бетона малоизвестен.

Это объясняется тем, что на строительстве очень часто уплотнение бетона производится небрежно, такой дефект особенно заметен при применении ультразвукового метода.

Указанные проблемы попытаемся проиллюстрировать каким-нибудь примером. Предположим, что речь идет о контроле качества бетона, который вызывает сомнения потому, что был заморожен тотчас после укладки в дело. Хотя работа выполнена в течение пяти холодных дней, испытание бетона откладывалось до наступления потепления с наружной температурой  $+5—10^{\circ}\text{C}$ . Положительная температура воздуха необходима для того, чтобы обеспечить оттаивание замерзшей воды, возможно присутствующей в бетоне и в трещинах в виде льда, который является хорошим проводником ультразвука. После оттаивания льда и после частичной потери воды благодаря испарению и гидратации освободившиеся ото льда трещины становятся препятствием, через которое не может распространиться ультразвук; точность метода при этом повышается.

Что касается выбора метода измерения, то он зависит от поставленной задачи, например может использоваться дефектоскопия (см. раздел 2.5.6 или же определение параметров трещин 2.5.7) или другие методы.

3. Знание состава бетона, который следует испытать, является очень важным. Эти данные необходимо взять из журнала регистрации укладки бетона на строительстве и из сводки по изготовлению контрольных образцов для сопоставления между собой, с проектной маркой и фактической прочностью. С этой целью отделяются куски от образцов, на которых проверяется бетон. Часто бывает полезно исследовать поверхность излома.

Необходимыми сведениями являются: вид и дозировка цемента; вид и зерновой состав заполнителя; применяются ли добавки и какие.

Из перечисленных необходимых данных чаще всего приводят к ошибкам колебания дозировки цемента и зернового состава заполнителя. Фактический расход цемента иногда меньше, чем заданный, что приводит к переоценке фактической прочности бетона и даже зернового состава. Обычно в составе бетона с малым расходом цемента больше мелких фракций, чем предполагалось, что легко приводит к переоценке фактической прочности бетона. Если сведения, полученные на стройплощадке, показывают отклонения от параметров, предусмотренных проектным составом бетона, не приходится сомневаться в том, что эти отклонения характерны для бетона в сооружении.

4. Наличие контрольных образцов в период производства работ по укладке бетона является хорошим основанием для проверки данных применяемого состава бетона, а также средством уточнения зависимости «скорость—прочность». Испытание этих образцов неразрушающим, а затем разрушающим методами дает дополнительные экспериментальные данные для проверки тарировочной кривой в соответствии с разделом 2.5.10.

Опытные образцы, приготовленные из одного и того же бетона, но в бо-

лее поздний период его укладки, также полезны для проверки тарировочной кривой, особенно если производится уточнение коэффициентов созревания [50].

Имеется и другой путь контроля, связанный со специальными работами, которые заключаются в изготовлении контрольных образцов из тех материалов, что и примененные на строительстве, испытании их неразрушающим и разрушающим методами и использовании этих данных.

5. При испытании бетона в сооружении обращается внимание на выбор сечения и точек испытания, а также на подготовку места испытания. В колоннах предпочтительны сечения, расположенные в основании, в вершине и в середине колонны. Если необходимо проверить более внимательно элемент по сечениям, то увеличивают количество их, располагая сечения на расстоянии 30 см. Количество точек в сечении изменяется в зависимости от размера колонны от 4 до 8, точки располагаются попарно по противоположным сторонам колонны. Следует избегать расположения испытательных точек ближе чем 8—10 см от ребра колонны и не устанавливать преобразователи в направлении продольной арматуры. Измерительные сечения располагают на одинаковом расстоянии от хомутов.

При испытании балки сечение должно быть расположено строго перпендикулярно к оси балки. Количество принятых сечений зависит от объекта контроля, схемы нагрузки, схемы опирания и формы поперечного сечения. Для простых балок прямоугольного поперечного сечения принимают два сечения для определения прочности бетона ультразвуком, расположенные вблизи середины пролета, для неразрезных балок в шести поперечных сечениях, два в середине и два в зоне каждой опоры; в тонкостенных балках — в середине балки, в зоне максимальных касательных напряжений; здесь возникает необходимость в проведении дополнительных испытаний.

В сжатой зоне выбирают наибольшее количество точек испытания. Расположение точек испытания в растянутой зоне не оправдано, исключение составляет задача получения данных о сцеплении бетона с арматурой и о ее защите. Количество точек в одном сечении изменяется от 2 до 4 в зависимости от высоты балки. Необходимо избегать места, близкие к поверхности, с которой велась укладка бетона в балку (менее 4 см).

Для испытания плиты может быть применен обычный поверхностный метод. Для испытания плиты принимают два направления с расположением преобразователей на прямой линии длиной от 40 до 100 см. Это расстояние обычно достаточно для характеристики состояния бетона в соответствующей зоне. Точки для испытания необходимо располагать на сжатой стороне, т. е. на верхней в пролете и на нижней стороне у опоры, если плита неразрезная. Количество точек на прямой изменяется от 3 до 5\*.

Испытание перегородок производится обычно методом сквозного прозвучивания в точке, расположенной в одном из узлов сетки со стороной, изменяющейся между 50 и 100 см в зависимости от детальности проверки.

---

\* Надежные данные можно получить при поверхностном прозвучивании, представляя преобразователь-приемник с постоянным шагом 2—5 см не менее чем в 8—10 положений (примеч. науч. ред.).

Во всех случаях испытания железобетонных элементов на строительстве решающее значение для получения хороших результатов имеет тщательная подготовка места испытания. Если бетон покрыт штукатуркой, ее необходимо удалить долотом или молотком таким образом, чтобы на поверхности не было остатков штукатурки, а поверхность бетона не была повреждена. Место вокруг точки испытания должно быть очищено (20 × × 20 см) для того, чтобы затем можно было воспользоваться наждачной бумагой для выравнивания поверхности. С другой стороны, это необходимо для того, чтобы скорректировать направление прозвучивания. Необходимо обратить особое внимание на совпадение точек установки преобразователей на противоположных сторонах элемента. Ватерпас, угольник и отвес — вот принадлежности, на основе которых обеспечивается хорошая трассировка.

Применение той или иной контактной среды зависит от шероховатости поверхности и требований к ее чистоте, предъявляемых испытаниями; это пластилин или вазелин в обычных случаях, силиконы в специальных случаях.

Подготовка аппаратуры для испытания заключается в ее прогреве для ввода в устойчивый тепловой режим. До включения аппаратуры проверяется напряжение и применяемая частота (для проверки последнего параметра применяются частотомеры; необходимо, чтобы они были включены в комплект аппаратуры).

Применяемые преобразователи необходимо устанавливать на бетон при небольшом давлении. Метод снятия отсчетов на строительстве рекомендуется применять по амплитуде стандартного импульса (см. раздел 2.4.5). Непрерывной серии измерений должна предшествовать калибровка аппаратуры на эталоне.

Наиболее важным для точного определения скорости распространения является правильное измерение времени прохождения. С помощью вычислений можно доказать, что в особых случаях, как-то: при измерениях перегородок, плит, колонн и балок переменного поперечного сечения, необходимо использовать специальные приспособления. Обычно измерение времени прохождения должно производиться с точностью порядка 1—2%. Точность определения прочности бетона на строительстве приведена в разделе 2.5.10.11.

По опытам, проведенным в INCERC, применение ультразвукового метода на строительстве дало убедительные результаты в следующих случаях:

1) когда результаты, полученные на контрольных образцах, были посредственными благодаря небрежному изготовлению или плохим условиям их хранения, хотя они были приготовлены из того же бетона, что и уложенный в дело;

2) когда имеются местные дефекты при изготовлении пустотелых конструкций в швах, в отдельных зонах или в закрытых трещинах. Такие испытания были проведены на фундаментах под компрессор для химического завода, где имелись открытые швы, а также зоны расслаивания;

3) когда контрольные образцы и пробы, взятые из уложенного в дело бетона, уплотнялись различным способом и поэтому возникало сомнение в эквивалентности качества бетона, взятого из конструкции, и контроль-

ных образцов. Такие испытания были проведены с железобетонными оболочками, изготовленными центробежным способом, которые были использованы в качестве свай, погруженных на большую глубину;

4) когда твердение происходило в условиях пониженной температуры и поэтому возникло сомнение о возможности замораживания бетона во время твердения. Такие испытания были выполнены на стеновых блоках после оттаивания для многоэтажного здания с неполным железобетонным каркасом;

5) когда бетон был взят из уже уложенной бетонной смеси в конструктивный элемент большого поперечного сечения в период повышенных наружных температур и смесь не была предохранена от быстрой потери воды при испарении. Такого вида испытания были выполнены на комбинате по изготовлению бумажных мешков при определении качества бетонной смеси для колонн, изготовленных на строительстве;

6) когда материалы, в особенности цементы, не хранились под надзором, в результате чего для некоторой части конструктивных элементов был использован смешанный цемент. Для определения характеристик элемента, изготовленного на этом цементе, также был применен ультразвуковой метод. Такие испытания были проведены на сборных колоннах цеха металлургического завода.

Для предупреждения аварий необходимо применять конструктивные схемы, которые без разрушения способны выдерживать повышенные эксплуатационные воздействия. Подобный случай был рассмотрен при испытаниях зернохранилища с безбалочным перекрытием, когда несколько колонн дали осадку во время испытания перекрытий (см. рис. 2.40). Испытания показали, что основной причиной аварии является образование пустот внутри колонны под наклонной арматурой капители благодаря применению крупного заполнителя и низкого качества бетона в зоне расположения пустот.

При использовании метода укладки бетона в скользящей опалубке необходимо устанавливать те дефекты, которые возникают при передвижении опалубки. Если эти результаты использовать для определения прочности бетона в соответствующих зонах, можно недооценить фактическую прочность бетона, уложенного в конструкцию. Построение тарировочной кривой с помощью образцов, извлеченных из бетона, уложенного в дело, при использовании скользящей опалубки является обязательным.



### 3. МЕТОД ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

Развитие различных видов плоскостных конструкций с одной доступной стороной, к которым относятся плиты, требует проверки качества выполнения этих элементов с помощью разработанного современного неразрушающего метода.

Метод, которому посвящена эта глава, находится в стадии развития и является сложным как по технике измерения, так и по имеющейся аппаратуре, а также и по способу обработки данных и последующем их истолковании; но по окончательным результатам метод является перспективным. Сведения, относящиеся к определению трещин методом поверхностной волны, достаточно точны и во всех случаях оправдываются: этот метод перспективен и в отношении многослойных плит, также являющихся доступными с одной стороны [1, 2].

#### 3.1. ПРИНЦИП МЕТОДА

В качестве примера принимается наиболее простой случай бесконечной свободно лежащей плиты. Подобный случай не такой уж редкий, поскольку приблизительно можно представить все дорожные покрытия однослойными, лежащими на грунте, в котором фазовая скорость распространения упругих волн меньше, чем в плите [3] (напомним, что под фазовой скоростью подразумевают скорость распространения монохроматической непрерывной волны). В случае источника непрерывных синусоидальных колебаний Лэмб показал, что в плите (тонкой пластинке) распространяются два типа волн: первый тип — плоская волна (волна Лэмба)<sup>1</sup>: колебание материальных точек в ней симметрично по отношению к срединной плоскости плиты и волна в целом имеет симметричную форму колебаний. Перемещения частиц в этой волне происходят как по направлению движения ее, так и перпендикулярно плоскости плиты в отличие от продольных волн (волн растяжения—сжатия); второй тип волн — изгибные волны: в них колебания материальных частиц несимметричны по отношению к срединной плоскости плиты, составляя антисимметричную форму колебаний. Этот вид колебаний деформирует плиту подобно изгибающей нагрузке, и поэтому антисимметричные волны Лэмба называют изгибными.

---

<sup>1</sup> В научной литературе имеются синонимы: «нормальная симметричная волна», «продольная волна в тонкой пластине», «симметричная волна Лэмба» (примеч. науч. ред.).

Уравнение распространения симметричных волн Лэмба в бесконечной плите дано в общем виде:

$$\frac{\operatorname{tg} \zeta_T \frac{H}{2}}{\operatorname{tg} \zeta_L \frac{H}{2}} = \frac{4\zeta_T \zeta_L}{\eta^2 \zeta^2}, \quad (3.1)$$

в котором

$$\zeta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ — номер моды колебания (количество волн);} \quad (3.2)$$

$$\zeta_L = \zeta \sqrt{1 - \frac{C^2}{v_L^2}}; \quad (3.3)$$

$$\zeta_T = \zeta \sqrt{1 - \frac{C^2}{v_T^2}}; \quad (3.4)$$

$$\eta = 2 - \frac{C^2}{v_T^2}, \quad (3.5)$$

где  $C$  — фазовая скорость колебаний;  $\lambda$  — длина волн;  $H$  — толщина плиты, а  $v_L$  и  $v_T$  — скорости продольных и поперечных волн в плите.

Решение уравнения (3.1) приводит к значениям фазовой скорости симметричного типа колебаний, приведенным на рис. 3.1 ( $v_d = 0,25$ ). Эти значения при больших длинах волн становятся близкими к скорости продольной волны в плите:

$$v_p = \sqrt{\frac{E_d}{\rho_d(1 - v_d^2)}}, \quad (3.6)$$

где  $E_d$  и  $v_d$  представляют собой динамический модуль упругости и динамический коэффициент Пуассона материала.

Фазовая скорость волн небольшой длины для симметричного колебания Лэмба стремится к скорости поверхностной волны или волны Рэлея:

$$v_R = \frac{0,87 + 1,12v_d}{1 + v_d} \sqrt{\frac{E_d}{2\rho_d(1 + v_d)}}. \quad (3.7)$$

Вертикальное возбуждение колебаний в плите предпочтительнее, в особенности при создании волн Лэмба антисимметричного типа (изгибных).

Дисперсионная кривая для основных колебаний изгибных (антисимметричных) волн определяется из уравнения

$$\frac{\operatorname{tg} \zeta_L \frac{H}{2}}{\operatorname{tg} \zeta_T \frac{H}{2}} = \frac{\eta^2 \zeta^2}{4\zeta_T \zeta_L}. \quad (3.8)$$

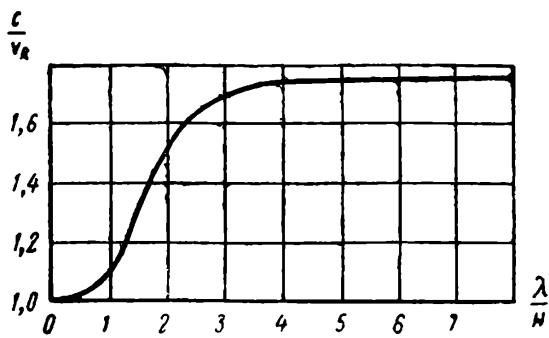


Рис. 3.1. Фазовая скорость волны в плите (симметричная мода)  $\nu_d = 0,25$

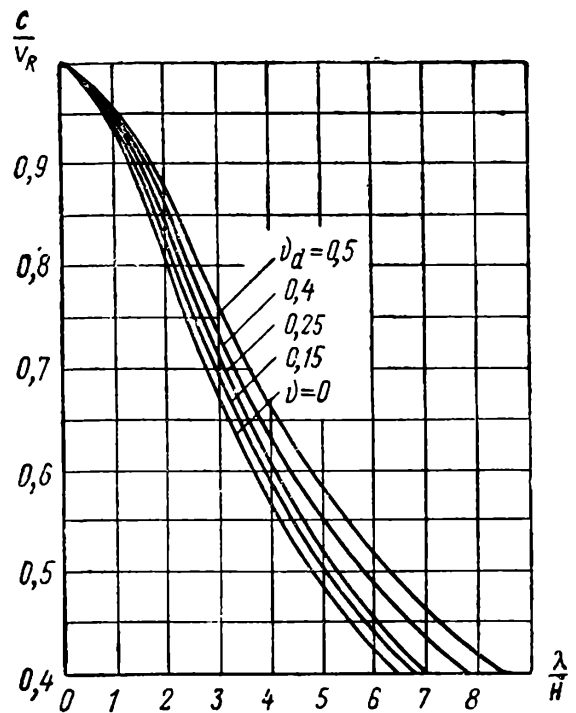
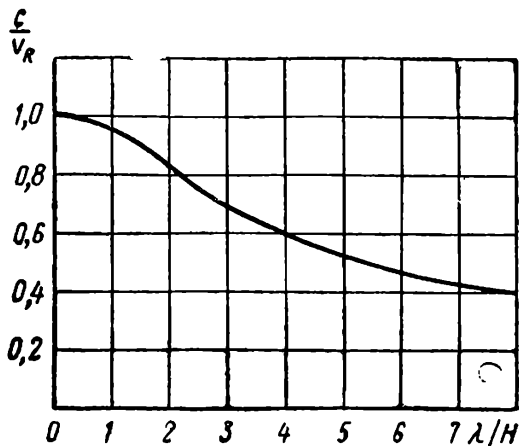


Рис. 3.3. Фазовая скорость изгибной волны в плите из материалов с разными коэффициентами Пуассона

Рис. 3.2. Фазовая скорость изгибной волны в плите (асимметричная мода)  $\nu_d = 0,25$

Легко можно доказать, что когда длина волны стремится к нулю, скорости обеих основных мод колебаний, как антисимметричного, так и симметричного, стремятся к одному пределу, что следует из уравнения

$$\eta^2 \zeta^2 - 4\zeta_T \zeta_L = 0. \quad (3.9)$$

Решение уравнения (3.9) для определения скорости поверхностной релеевской волны  $v_R$  возможно, если рассматривают плиту как полупространство.

Для сохранения основной моды симметричных колебаний имеется условие  $v_R < C < v_p$ , а для антисимметричных (изгибных) волн

$$v_T > v_R > C.$$

Решение уравнения (3.8) при выполнении второго условия в общем случае приводит к изменениям фазовой скорости изгибных волн, приведенным на рис. 3.2 ( $\nu_d = 0,25$ ). Эта дисперсионная кривая зависит от значения коэффициента Пуассона материала, как это следует из рис. 3.3 и табл. 3.1 [4]. Из таблицы видно, что небольшие изменения динамического коэффициента Пуассона, который для затвердевшего бетона в среднем находится около значения 0,25, не изменяют существенно результатов испытания. Ошибки в оценке толщины благодаря изменениям коэффициента Пуассона в пределах 0,2 и 0,3 могут колебаться между 3 и 5%. Более точное определение возмож-

но в том случае, когда бетон взят непосредственно из плиты в виде высверленного керна, который испытывается параллельно ультразвуковым и резонансным методами (см. раздел 1) с измерением при этом как скорости распространения, так и собственной частоты продольных колебаний. Из относительно простого выражения можно определить динамический коэффициент Пуассона [см. уравнение (1.59)].

Таблица 3.1. Координаты точек дисперсионных кривых при различных коэффициентах Пуассона

$\frac{C}{v_R}$	$\frac{\lambda}{H}$			
	$v_d = 0,2$	$v_d = 0,25$	$v_d = 0,33$	$v_d = 0,45$
0,9	1,42	1,45	1,5	1,62
0,8	2,18	2,23	2,33	2,53
0,7	3	3,07	3,22	3,5
0,6	3,98	4,08	4,27	4,65
0,5	5,26	5,38	5,64	6,12
0,4	7,05	7,21	7,55	8,19
0,3	9,88	10,1	10,6	11,5
0,2	15,3	15,7	16,4	17,8
0,1	31,3	32	33,5	36,2

Из литературных источников [4] следует, что для реальных сред при распространении изгибных волн существует уравнение

$$0,4 < \frac{C}{v_R} < 0,7. \quad (3.10)$$

На основе анализа табл. 3.1 можно принять изменение отношения  $\frac{v_R}{C}$  линейным в зависимости от отношения  $\frac{\lambda}{H}$ .

Мы видим, что ордината в начале этой прямой почти постоянна [6.7]. Это уравнение прямой для симметричных волн Лэмба можно написать<sup>1</sup>:

$$\text{для } v_d=0,2 \quad \frac{v_R}{C} = 0,62 + 0,265 \frac{\lambda}{H}; \quad (3.11)$$

$$\text{» } v_d=0,25 \quad \frac{v_R}{C} = 0,618 + 0,26 \frac{\lambda}{H}; \quad (3.12)$$

$$\text{» } v_d=0,33 \quad \frac{v_R}{C} = 0,616 + 0,248 \frac{\lambda}{H}; \quad (3.13)$$

$$\text{» } v_d=0,45 \quad \frac{v_R}{C} = 0,612 + 0,229 \frac{\lambda}{H}. \quad (3.14)$$

<sup>1</sup> Для изгибных (антисимметричных) волн Лэмба можно пользоваться непосредственно табл. 3.1 при определении  $H$  с использованием интерполяции (примеч. науч. ред.).

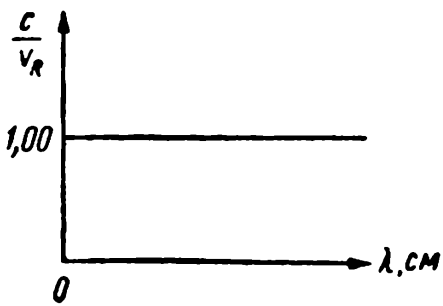


Рис. 3.4. Дисперсионная кривая илистого грунта

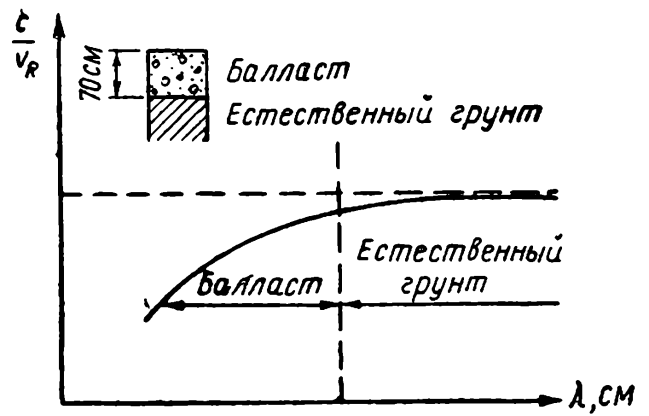


Рис. 3.5. Дисперсионная кривая двухслойной структуры: балласт — естественный грунт

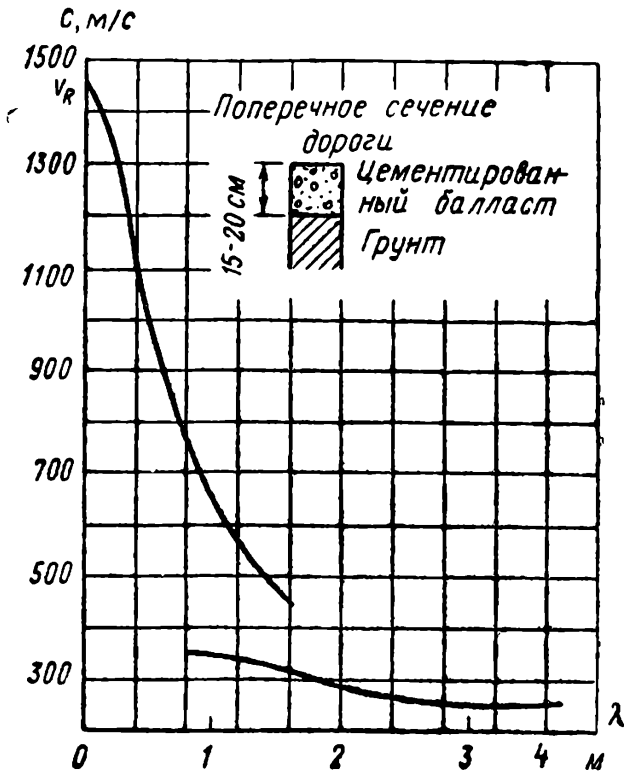


Рис. 3.6. Дисперсионная кривая двухслойной структуры: цементированный балласт — собственно грунт

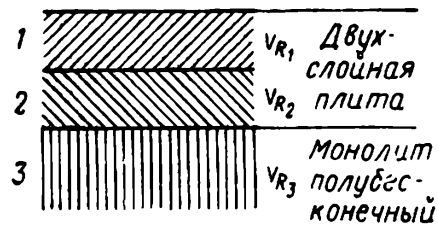


Рис. 3.7. Трехслойная структура

Порядок использования абсолютных величин в уравнениях (3.11)—(3.14) для определения толщин следующий. С помощью дисперсионной кривой выбирают значение  $\lambda$ , которое соответствует заданному отношению  $\frac{c}{v_R}$  и заключается между 0,4 и 0,7. В одно из уравнений (3.11)—(3.14) вводят пару значений  $\frac{c}{v_R}$  и  $\lambda$ , соответствующих определенному или предполагаемому значению коэффициента Пуассона, затем определяют толщину плиты  $H$ .

1. Один из видов дисперсионной кривой для свободно лежащей плиты изображен на рис. 3.2. На рис. 3.4 изображена дисперсионная кривая фазовой скорости волн Лэмба в илестом грунте, который практически однороден и может быть принят за бесконечное полупространство; из рис. 3.4 видно, что скорость волн Лэмба является постоянной и одинаковой с релеевской скоростью ( $v_R = 220 \text{ м/с}$ ).

2. Если выше подошвы грунта расположен слой балласта, тогда дисперсионная кривая имеет вид, изображенный на рис. 3.5 (для случая, когда в качестве балласта применяется влажный известняковый щебень). Длина

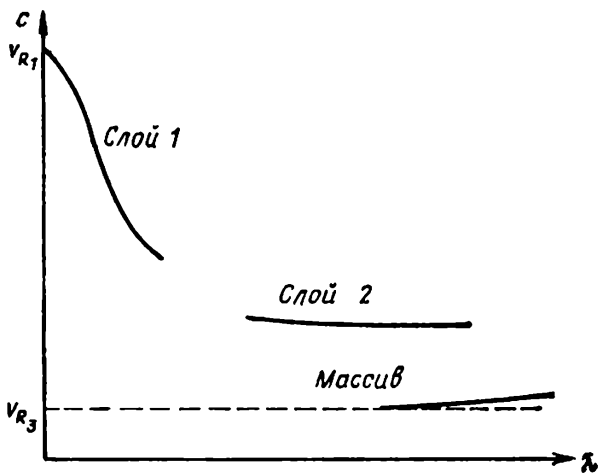


Рис. 3.8. Дисперсионная кривая структуры из рис. 3.7 с очень слабым вторым слоем

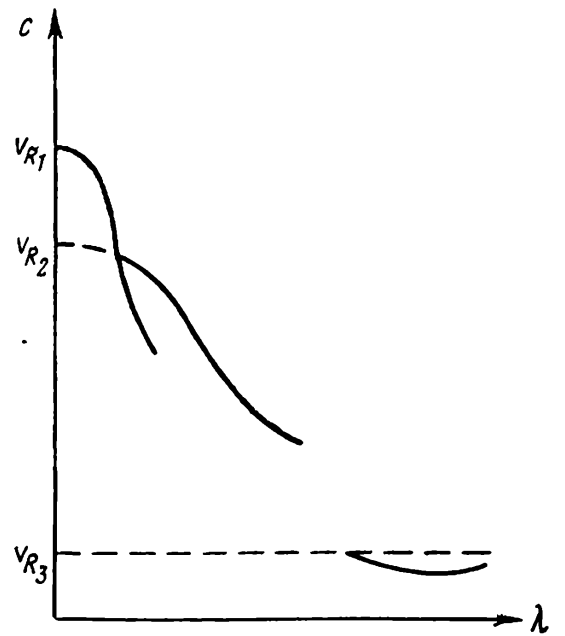


Рис. 3.9. Дисперсионная кривая структуры из рис. 3.7 с более слабым вторым слоем, но близким к первому жесткому слою ( $v_{R1} > v_{R2}$ )

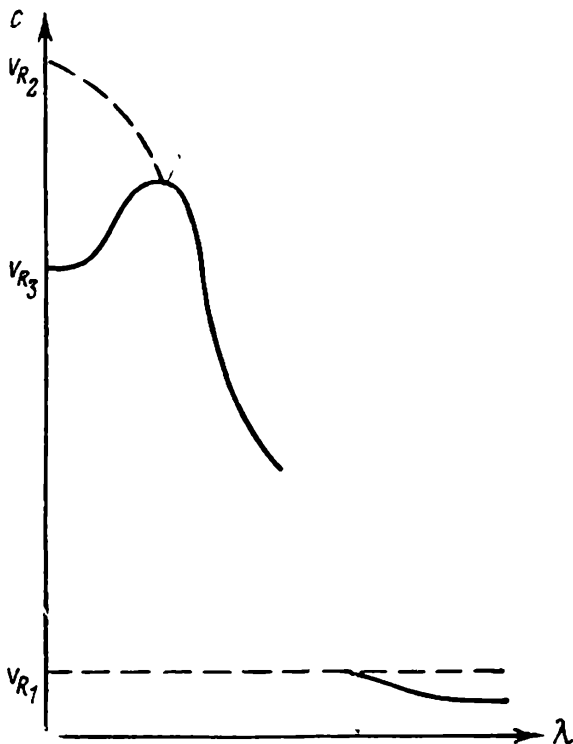


Рис. 3.10. Дисперсионная кривая структуры из рис. 3.7 с более жестким вторым слоем, чем первый слой ( $v_{R1} < v_{R2}$ )

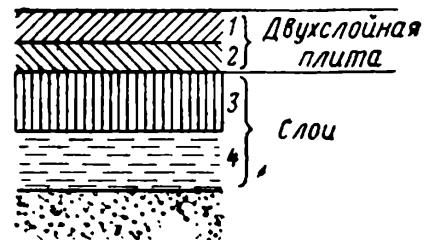


Рис. 3.11. Многослойная структура

волны  $\lambda$ , с которой происходит распространение волн Лэмба в грунте, изменяется, как правило, между 2 и 3 м при толщине балластного слоя, равного 70 см. Скорость в балласте может быть между 100 и 200 м/с, в то время как в естественном грунте она находится в пределах 25—320 м/с.

3. Если в поперечном разрезе имеются два компонента, один из которых образует слой относительно жесткий, например гравийный цементный бетон, уложенный по естественному грунту, тогда дисперсионная кривая принимает вид, показанный на рис. 3.6. Верхняя ветвь кривой соответствует гравийному цементному бетону, нижняя — грунту.

4. Если испытывается структура, в состав которой входят три составные части, из которых два верхних слоя разреза объединены и образуют плиту, уложенную на полубесконечный массив (рис. 3.7), тогда дисперсионная кривая имеет вид, показанный на рис. 3.8. Если второй слой более слабый, чем первый, и значение жесткости известно очень приближенно, то дисперсионная кривая имеет вид по рис. 3.9.

Если два верхних слоя по своей структуре представляют собой двухслойную плиту (см. рис. 3.7), в которой второй слой более жесткий, чем первый ( $\nu_{R_2} < \nu_{R_1}$ ), тогда вид дисперсионной кривой изменяется согласно рис. 3.10.

Если два слоя в двухслойной плите по своей жесткости эквивалентны, то дисперсионная кривая соответствует общей толщине плиты:

$$H = H_1 + H_2. \quad (3.15)$$

5. Если структура многослойная и соответствует схеме, представленной на рис. 3.11, тогда отсутствует точное теоретическое решение. Однако экспериментальным путем установлено, что в этом случае возможно получение дисперсионной кривой для двухслойной жесткой плиты в слоях 1 и 2. Промежуточные слои не выделяются, кроме тех, у которых жесткость достаточно отличается между собой. В зависимости от толщины промежуточного слоя могут рассматриваться два варианта:

- промежуточный слой незначительной толщины;
- промежуточный слой большой толщины.

Проблема многослойной структуры еще достаточно неясна, хотя имеется большой экспериментальный материал, который позволяет расшифровать некоторые явления по аналогии и дать направление научным исследованиям.

## 3.2. ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Аппаратура для возбуждения и приема поверхностных волн [8, 9, 10] состоит из возбудителя колебаний 1 (рис. 3.12), соединенного с генератором 2 через мощный усилитель 3, обеспечивающий заданную частоту и амплитуду колебаний. Электронно-счетный частотомер 4, включенный параллельно генератору, обеспечивает контроль частоты генератора колебаний.

Сигнал от генератора подается непосредственно на горизонтальные отклоняющие пластины  $x$  осциллоскопа 6 и через фазовращатель 5, сдвигающий фазу на  $90^\circ$ , поступает на вертикальные отклоняющие пластины  $y$  осциллоскопа 6. Таким образом, на экране электронно-лучевой трубки будет наблюдаться результирующая кривая в виде окружности.

С другой стороны, колебания, возбужденные возбудителем 1, распространяются по плите, принимаются звукоприемником 7, преобразуются им в электрический сигнал, который усиливается селективным усилителем 8, и подается в фазовый отметчик 9. В фазовом отметчике в момент перехода сигнала через нулевое значение вырабатывается короткий прямоугольный импульс, который поступает затем на вход отклонения по оси  $7$ , вызывая появление на линии развертки яркой светящейся точки, соответствующей начальной фазе принятого сигнала. Применение селективного усилителя, на-

строенного на частоту сигнала, позволяет значительно повысить помехоустойчивость устройства. Экран разделен на 100 частей, равных периоду, и так как за одно полное колебание звуковая волна проходит путь, равный длине волны  $\lambda$ , последовательные измерения на переменном расстоянии между излучателем и приемником при известной частоте и скорости позволяют путем вычисления определить длину волны  $\lambda$ . По  $C$  и  $\lambda$  строится дисперсионная кривая (см. п. 3.3).

Для различных полос частот применяются различные преобразователи и дополнительная аппаратура; в частотном интервале 25—300 гц усилитель мощности 2 — это усилитель звуковой частоты (50 вт), который обеспечивает ток 2а электродинамический вибратор типа Гудмана (рис. 3.13) с катушкой и выдвижным сердечником, имеющий коэффициент электро механической связи 2,5 кг/а. Цилиндрическая катушка 1 смонтирована на кольцевом магните с воздушным зазором и закреплена на гибкой центрированной подвеске 2. В воздушном зазоре возникает магнитное поле большой мощности благодаря наличию магнита 3. Конус привода 4 жестко закреплен с катушкой 1 таким образом, что, когда в катушку поступает переменный ток, катушка и конус начинают одновременно вибрировать, передавая колебания тому основанию, с которым имеется непосредственный контакт.

Волны, обнаруженные геофоном, приводят в движение сейсмическую массу токовой катушки, которая расположена внутри постоянного магнитного поля. Если катушка перемещается, нарушается баланс и переменный магнитный поток становится пропорциональным скорости перемещения, которое создает напряжение

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} . \tag{3.16}$$

Это напряжение в свою очередь пропорционально скорости перемещения сейсмической массы. Затухание колеблющейся системы электромагнитное. Характеристики применяемого геофона следующие: диапазон частот 25—300 гц, чувствительность 0,2—8 в/см/с, сопротивление катушки 200—300 ом, сопротивление параллельной обмотки 400—600 ом для создания затухания, равного 60—70% собственной частоты, равной примерно 40 гц.

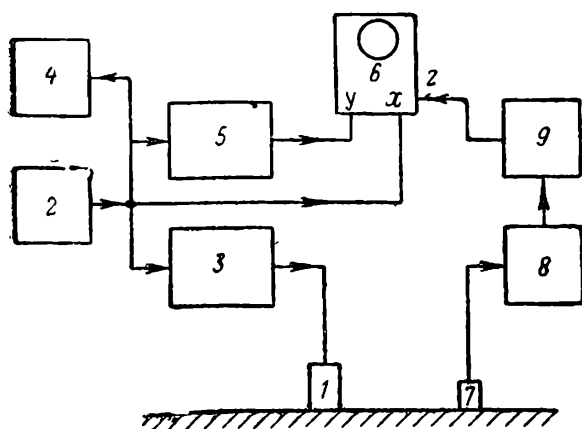


Рис. 3.12. Блок-схема аппаратуры для измерений по методу поверхностной волны (RRL)

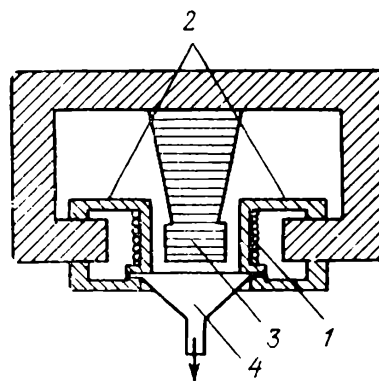


Рис. 3.13. Схема возбудителя колебаний типа Гудмана



Для частот от 300 до 5000  $гц$  применяются одинаковые излучатель и приемник колебаний в виде биморфного пьезокристалла с собственной частотой около 2  $кгц$ .

В области колебаний от 5000 до 30 000  $гц$  принят пьезоэлектрический преобразователь с сегнетокерамическим материалом (титанатом бария) в виде полого цилиндра. Излучатель соединен с усилителем 2 переменной мощности, выход которого согласован с емкостью цилиндра излучателя и возбуждает его на одной из резонансных частот. Преобразователь имеет длину 15  $см$ , наружный диаметр 2,5  $см$  и внутренний 1,9  $см$ . Четыре последовательных резонанса этого преобразователя соответствуют частотам 5, 10, 14 и 24  $кгц$ . Преобразователь помещен в цилиндрическую медную оболочку для механической защиты и экранирования.

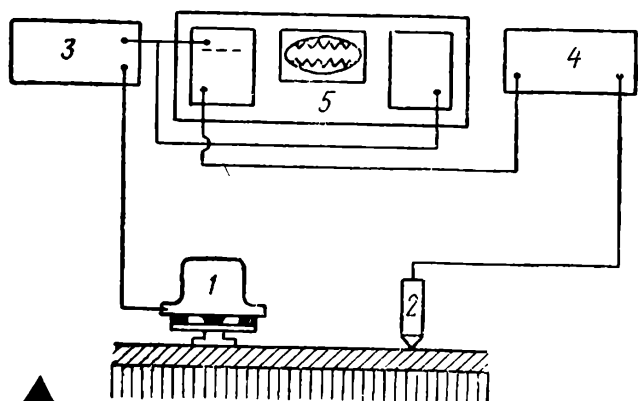


Рис. 3.14. Блок-схема аппаратуры для измерений по методу поверхностной волны (Парижская центральная лаборатория мостов и дорог)

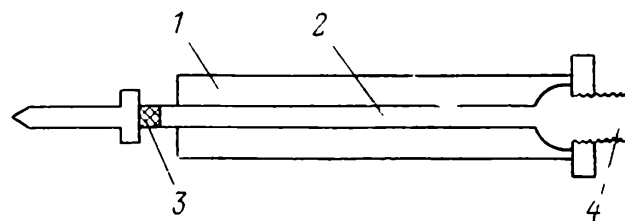


Рис. 3.15. Пьезоэлектрический преобразователь

1 — изолятор; 2 — стержень; 3 — кристалл; 4 — штепсель выхода

Предпочтительным является применение преобразователя-приемника с круглым коническим концом, имеющим диаметр 0,6  $см$ , который позволяет измерять волны небольшой длины. Контактный преобразователь накладывается на вертикальную плоскость испытываемой плиты, связь с которой обеспечивается вязким вазелином. По указанной схеме было проведено испытание в Дорожной исследовательской лаборатории в Англии.

Схема, принятая в Центральной лаборатории мостов и дорог во Франции, представлена на рис. 3.14. Эта схема в некоторой степени упрощенная [11, 12]. Головки излучателя 1 и приемника 2 практически одинаковы, но чувствительность схемы снижается из-за использования низкочастотного генератора мощности 3, который включает как генератор колебаний, так и усилитель мощности, и выходной трансформатор. Диапазон частот этого прибора от 20  $гц$  до 20  $кгц$ , максимальная мощность 200  $вт$ .

В приемной цепи также имеется селективный усилитель 4 типа EL-40 и двухкаскадный усилитель напряжения с заданной полосой пропускания, образующие резонансный контур, в котором применяется мощное селективное реактивное сопротивление, включенное через сдвоенный Т-образный фильтр. Прибор работает в диапазоне частот от 11 до 14 000  $гц$  и имеет диапазон усиления 58  $дб$ .

Позиция 5 на блок-схеме — французский осциллоскоп RM 561-A.5, который состоит из трех частей:

двухлучевой электронно-лучевой трубки размером  $8 \times 10$  см с напряжением 3,5 кВ, позволяющей наблюдать картину переданных и принятых волн, чтобы определять их совпадение по фазе;

генератора развертки (2B67), который обеспечивает скорость развертки между 1 мкс/деление и 5 с/деление с точностью до 3% и синхронизацией с измеренной частотой;

усилителя для вертикального отклонения (3A72), обеспечивающего усиление соответствующего сигнала по вертикали с шириной полосы 0—650 кГц, чувствительностью между 10 мВ/деление и 20 В/деление и входным импедансом 1 Мом — 47 пкф.

Во французской схеме отсутствуют цифровой частотомер, фазовращатель и фазовый отметчик, что затрудняет измерения, так как необходимо производить поиск в процессе испытания совпадения или несовпадения по фазе, что приводит к меньшей точности. Измерение высокой частоты вплоть до 14 кГц не обязательно для точного определения величины скорости —  $v$ .

На рис. 3.15 приведена схема пьезоэлектрического преобразователя — приемника с титанатом бария, разработанного в той же лаборатории.

### 3.3. ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Плита, которая должна быть испытана, выбирается из штабеля, на нее наносится ось испытания. Чтобы ось была удобно расположена, ее намечают в центральной зоне плиты и посередине ее устанавливают излучатель, что позволяет проводить измерения в одну и другую стороны. Для низких частот в относительно коротких плитах излучатель размещают в конце намеченной оси, поскольку необходимо избегать измерений на коротких расстояниях, на которых гипотеза плоской волны не подтверждается [13].

Размещение вибратора в середине плиты наиболее удачно, так как это позволяет избежать отражения волн. На измеряемой оси размещают ряд точек для расположения приемных преобразователей. В диапазоне от 600 до 1000 Гц измерения необходимо начинать при расстояниях между преобразователями около 150 см; место для приемника готовится размером  $30 \times 30$  см. Для получения достоверных результатов необходимо для любого диапазона выбирать длину линии наблюдений в 4—5 длин волн. Для частот около 600 Гц в бетоне длина волны может быть около 6 м и сверх этого нужно учесть «мертвое пространство» около 1,5 м вблизи вибратора. По этим данным видно, что низкие частоты применяются при выполнении испытаний на больших плитах.

Место испытания предварительно обрабатывают шлифовальным камнем для улучшения акустического контакта.

Аппаратура снабжается электроэнергией с помощью собственного источника энергии. Как правило, для этого достаточно мощность, равная 500 Вт.

До начала испытания аппаратуру необходимо прогреть в течение получаса для установления стабильного теплового режима. В конце этого периода можно начинать испытание, которое состоит в измерении изменения фазы принятого сигнала по мере того, как приемник удаляется от излучателя.

В заключение следует проиллюстрировать сказанное примерами, часть которых выполнена Пейджем Дж. и Фэкзоару И. в R.R.L. (Дорожной ис-

следовательской лаборатории) на дорожных плитах. Результаты этих испытаний приведены на рис. 3.16—3.18, в которых по ординате откладываются расстояния между излучателем и приемником, а по абсциссе отсчитывают приращение длины волны (смещение фазы). Полученный наклон прямых представляет собой величину длины волны для различных частот:

$$\lambda = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta l}{\Delta \lambda}. \quad (3.17)$$

Одновременно по известной длине вычисляют фазовую скорость из уравнения

$$C = f\lambda. \quad (3.18)$$

Результаты испытаний плиты на различных частотах с использованием формул (3.17) и (3.18) представлены в табл. 3.2.

Т а б л и ц а 3.2. Фазовые скорости изгибных волн в бетонной плите

$f, \text{гц}$	$\lambda, \text{см}$	$C, \text{м/с}$	$C/v_R$	$f, \text{гц}$	$\lambda, \text{см}$	$C, \text{м/с}$	$C/v_R$
607	156,5	950	0,386	4 000	48,2	1930	0,785
913	131	1195	0,486	4 501	43,5	1960	0,798
1108	114	1260	0,512	5 004	40,8	2010	0,817
1501	93	1395	0,568	9 449	30	2830	—
2095	75	1570	0,638	12 745	20	2550	—
2779	61,2	1700	0,692	22 055	11	2430	0,989
3505	56	1960	—				

Иногда оказывается, что смещение фазы в зависимости от расстояния между излучателем и приемником нелинейно или же полученные результаты наносятся на график в виде отрезков прямых с различным наклоном (см. рис. 3.18). Это происходит по следующим причинам [14]:

1) из-за различных упругих свойств испытываемого материала в направлении испытания или из-за присутствия трещиноватого участка. Получаемая погрешность обычно обнаруживается на одном и том же расстоянии от излучателя для всех применяемых частот;

2) из-за постепенного изменения качества контакта между излучателем и поверхностью плиты, вызываемым постепенным расслоением, разжижением соединительной среды. Это явление обуславливает систематический фазовый сдвиг, который накапливается при измерениях. Наличие такого явления может быть легко проверено повторными измерениями;

3) из-за интерференции между двумя или больше формами различных колебаний (например, продольными и изгибными). Когда частоты колебаний различных форм сравнимы, интерференция может быть настолько интенсивной, что определение фазовой скорости для одной из форм колебаний станет невозможным.

На рис. 3.19 представлены изменения фазовой скорости  $C$  в зависимости от длины волны  $\lambda$  и дисперсионная кривая изгибных волн, возбуждаемых в плите. Скорость поверхностной волны определяется путем экстраполяции дисперсионной кривой к нулю. Если плита однослойная, то кривая, приведенная на рис. 3.19, в виде сплошной линии и измеренная для частот 9449

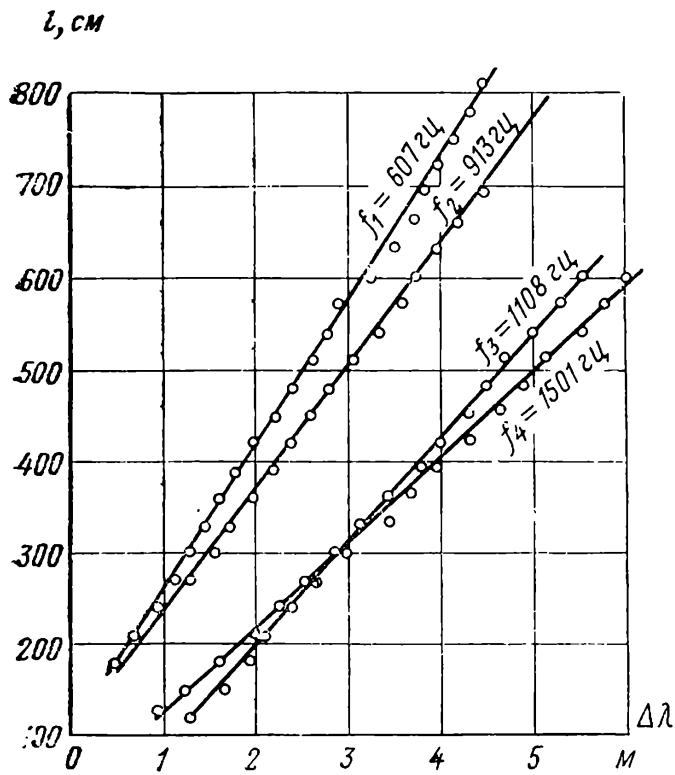


Рис. 3.16. Определение длины волны для низкой частоты

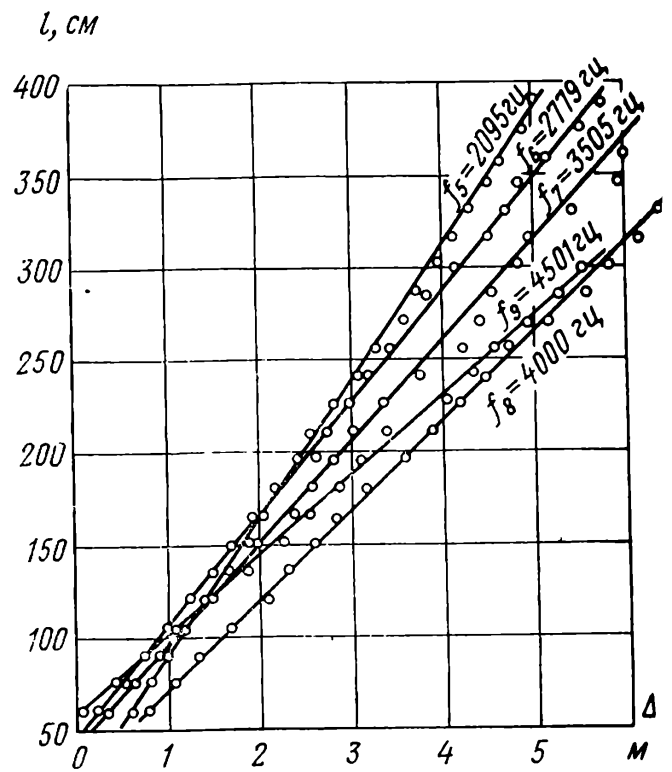


Рис. 3.17. Определение длины волны для средней частоты

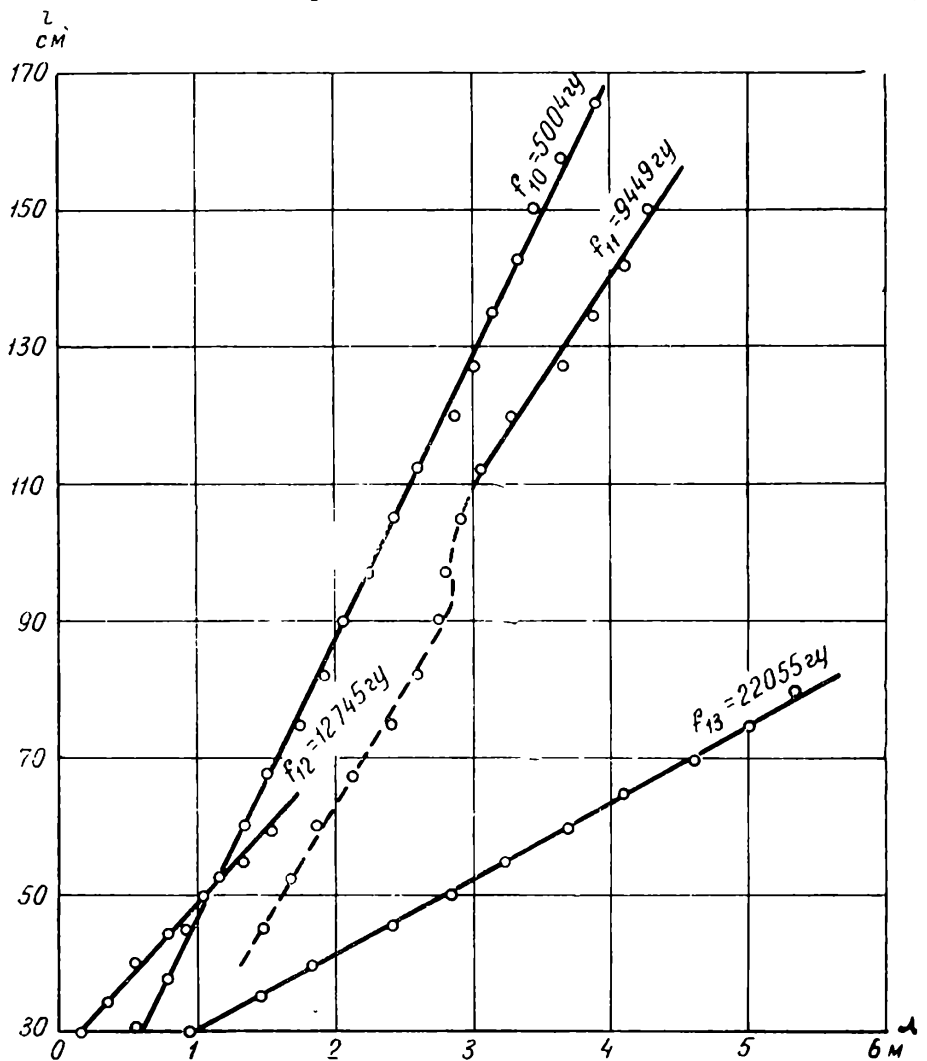


Рис. 3.18. Определение длины волны для высокой частоты

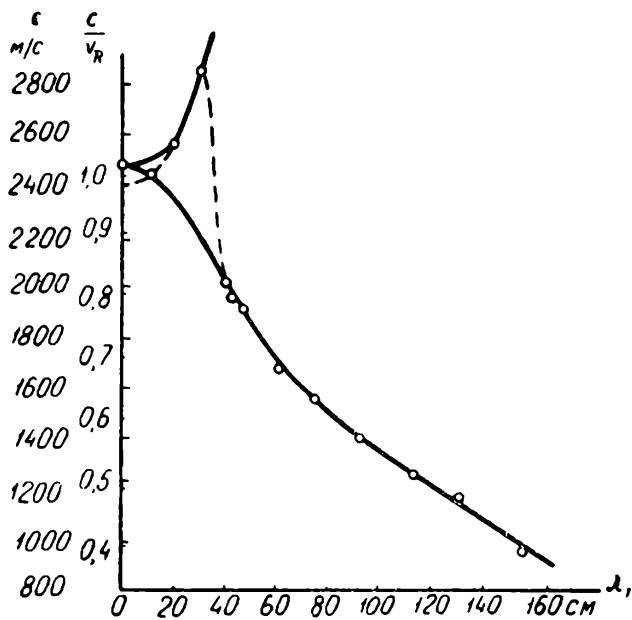


Рис. 3.19. Дисперсионная кривая для однослойной бетонной плиты

и 12 745 *гц* соответствует симметричной форме колебаний (т. е. справедлива восходящая ветвь). Скорость поверхностной волны в этом случае равна  $v_R = 2460$  *м/с*. Если испытываемая плита двухслойная, в которой нижний слой меньшей жесткости, чем верхний, тогда дисперсионная кривая соответствует пунктирной линии, как это показано на рис. 3.19. Все измерения, относящиеся к этой ветви дисперсионной кривой, определяют антисимметричные колебания. Скорость поверхностной волны в первом слое плиты в этом случае составляет  $v_R = 2400$  *м/с*, что очень мало отличается от предыдущей. Было экспериментально проверено предположение о распространении волн в плите как однослойной структуре — предположение соответствовало фактическому положению вещей.

Расчет скорости поверхностной волны в основном слое плиты в предположении, что она двухслойная, дал значение около 2900 *м/с*, тогда скорость продольной волны в основном слое бетона должна быть около 5400 *м/с*, что нереально. В результате проведенных испытаний и расчета плиты как однослойной структуры скорость распространения продольной волны получена около 4550 *м/с*. Такое значение логически соответствует хорошо вибрированному плотному бетону с тяжелым заполнителем. Определение толщины испытываемой плиты производилось по одному из соотношений (3.11) — (3.13) в зависимости от измеренной величины коэффициента Пуассона. Лабораторными испытаниями определено точное значение для коэффициента Пуассона испытываемого бетона, равного  $\nu_d = 0,25$ . В этих условиях применяется формула (3.12) или используются данные соответствующей колонки табл. 3.1 совместно с дисперсионной кривой из рис. 3.19; тогда получаем следующие толщины плиты в *см*:

$$\left. \begin{aligned} \text{для } \frac{C}{v_R} = 0,7 \quad H_1 = 20; \\ \text{» } \frac{C}{v_R} = 0,6 \quad H_2 = 20,5; \\ \text{» } \frac{C}{v_R} = 0,5 \quad H_3 = 21,7; \\ \text{» } \frac{C}{v_R} = 0,4 \quad H_4 = 21,2. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

На основании полученных значений средняя толщина плиты равна 20,8 *см*, что хорошо согласуется с толщиной, измеренной путем высверливания керна.

### 3.4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНЫ

В заключение дается общий обзор применения метода поверхностной волны и полученных результатов. Имеется возможность расширения области применения, однако тем, кто желает выполнить эту работу, необходимо учитывать условия, выдвинутые теорией, сформулированной выше, а именно: в отношении к материалу — изотропия, однородность, упругость, а также относящиеся к геометрии — протяженность слоя материала в плане, четкая граница поверхности раздела между слоями, непрерывность перемещений и усилий по горизонтали.

#### 3.4.1. Определение упругих свойств материала

Определение упругих свойств методом поверхностной волны [15] основано на определении скорости поверхностной волны  $v_R$ . Если эта скорость известна, динамический модуль упругости материала вычисляют по основному уравнению:

$$E = \frac{2(1 + \nu_d)^3}{(0,87 + 1,12\nu_d)^2} \rho_d v_R^2, \quad (3.20)$$

в котором  $\rho_d = \frac{\gamma_d}{g}$  представляет собой плотность материала. Уравнение (3.20) можно переписать в упрощенном виде для затвердевшего бетона ( $\nu_d = 0,25$ ):

$$E_d = 2,93 \rho_d v_R^2 \quad (3.21)$$

—выражение, действительное для любой системы единиц, при условии, что  $E_d$ ,  $\rho_d$  и  $v_R$  выражаются в согласованных единицах.

Определение модуля сдвига  $G_d$  еще проще, если пользуются формулой

$$G_d = \left( \frac{1 + \nu_d}{0,87 + 1,12\nu_d} \right)^2 \rho_d v_R^2. \quad (3.22)$$

Уравнение (3.22) для затвердевшего бетона принимает вид

$$G_d = 1,18 \rho_d v_R^2. \quad (3.23)$$

Определение упругих свойств материала методом поверхностной волны выполняется на основе различных видов решений с использованием теории распространения в полубесконечном массиве в соответствии с (3.1). Для выполнения измерений пользуются [5.2] и принимают: для аллювиального слоя  $v_R = 220$  м/с, песка илистого  $v_R = 170$  м/с, мергелистой глины в зависимости от содержания воды в материале  $v_R = 200 \div 400$  м/с, грунт  $v_R = 200 \div 300$  м/с.

В табл. 3.3 даны значения упругих постоянных материалов, часто встречающихся при использовании метода поверхностной волны.

Таблица 3.3. Упругие постоянные некоторых дорожных материалов

Материал	$\nu_d'$ кгс/дм <sup>3</sup>	$\nu_d$	$v_R$ , м/с	$E_d'$ кгс/см <sup>2</sup>	$G_d'$ кгс/см <sup>2</sup>
Цементный дорожный бетон . . .	2,35	0,252	2400	400 000	160 000
Асфальтобетон . . . . .	2,3	0,4	1500	165 000	59 000
Цементированный балластный слой	2,1	0,25	1400	123 000	50 000
Шлак . . . . .	2,1	0,25	1250	98 000	40 000
Балласт (гравийный дорожный под- стилающий слой) . . . . .	2	0,25	300	5 400	2 200
Песок . . . . .	2	0,25	250	3 700	1 500
Наносный грунт . . . . .	2	0,25	200	2 400	1 000

### 3.4.2. Контроль качества бетона в сооружении

Качество работ контролируют методом поверхностной волны на основе значений, полученных для скорости поверхностной волны  $v_R$  [14]. В табл. 3.4 приведены характерные значения скоростей волн Рэлея для материалов обыкновенного качества и для поврежденного слоя (графа 2), а также для соответствующего материала хорошего качества, правильно уложенного в сооружение (графа 3), часто применяемых в дорожных конструкциях. Пределы, приведенные в таблице для асфальтобетона, зависят от температуры и пригодны для интервала температур 10—15° С. Следует отметить, что у асфальтобетонов обыкновенного качества скорость поверхностной волны не должна превышать 1600 м/с, более высокие скорости говорят о переуплотнении дорожного покрытия; оно становится крайне жестким, недостаточно деформативным под нагрузкой, что ведет к снижению его трещиностойкости.

На рис. 3.20 представлена дисперсионная кривая для бетона фундамента и шлакобетонной дорожной плиты ( $H = 20$  см). Отмечается заметная разница между скоростью поверхностной волны в плите  $v_R'$ , равной около 2400 м/с, и в бетоне фундамента  $v_R''$ , равной 2000 м/с, которая отражает качество того и другого бетона. Для бетона очень хорошего качества скорость поверхностной волны может достигнуть 2600 м/с, в то время как для дефектного материала может снизиться до 2000 м/с [16].

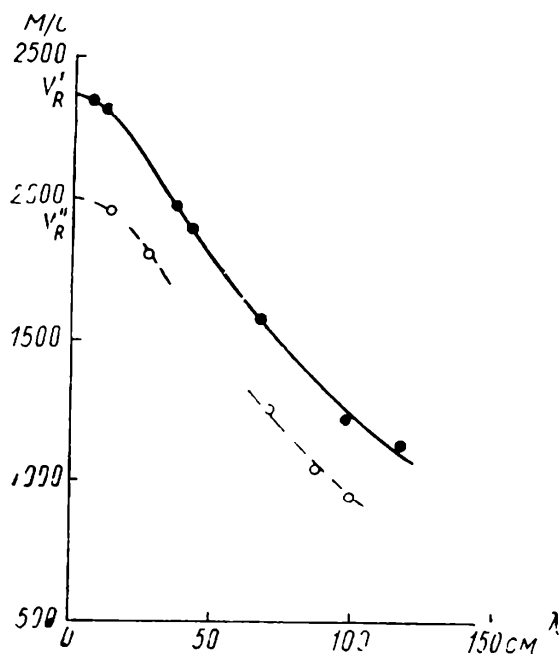


Рис. 3.20. Дисперсионная кривая для бетонов, различных по качеству

○ — фундамент на цементном вяжущем; ● — бетонная плита ( $H = 20,3$  см)

### 3.4.3. Определение прочности бетона методом поверхностной волны

Метод определения прочности бетона, основанный на непосредственном измерении скорости поверхностной волны, связан с использованием пары преобразователей повышенной частоты, как правило, между

Таблица 3.4. Значение скоростей поверхностной волны для различных по качеству материалов

Материал	$v_R$ , м/с для материала обычного качества или для слоя пониженного качества	$v_R$ , м/с для материала хорошего качества
Цементный дорожный бетон . .	$\leq 2100$	2200—2600
Асфальтобетон .	$< 1200$ $> 1600$	1200—1600
Цементированный дорожный подстилающий слой .	700—1200	1200—2000
То же, на шлаковом вяжущем .	800—1200	1200—2000
Балласт со щебнем . . . . .	$< 300$	300—450
Балласт природный . . . . .	$< 200$	250—300

Таблица 3.5. Значения соотношения  $\frac{v_L}{v_R}$

$v_d$	$\alpha = \frac{v_L}{v_R}$	$v_d$	$\alpha = \frac{v_L}{v_R}$
0	1,62	0,4	2,6
0,05	1,65	0,45	3,5
0,1	1,68	0,46	3,87
0,15	1,73	0,47	4,42
0,2	1,79	0,48	5,35
0,25	1,88	0,49	7,48
0,3	2,02	0,5	$\infty$
0,35	2,23	—	—

20 и 30 кг/см<sup>2</sup> в зависимости от толщины плиты (см. схемы, приведенные на рис. 3.12 или 3.14).

Из сказанного следует, что необходимо преобразование скорости поверхностной волны в скорость продольной волны. Это преобразование производится по формуле

$$v_L = v_R \sqrt{\frac{2(1 - v_d)}{1 - 2v_d}} \cdot \frac{1 + v_d}{0,87 + 1,12v_d} \quad (3.24)$$

Преобразование можно произвести непосредственно и с помощью табл. 3.5.

В любом из этих вариантов предполагается, что динамический коэффициент Пуассона материала известен. Для затвердевшего бетона в возрасте свыше 14 суток можно ориентировочно принять значение  $v_d = 0,25$ . Ошибки, которые могут происходить в оценке значений скорости продольной волны в условиях, когда  $v_d$  меняется от 0,2 до 0,3, менее  $\pm 5\%$ . Значение  $v_L$  можно определить, пользуясь указаниями гл. 2; прочность вычисляется с учетом созревания и состава бетона (см. п. 2.5.10).

Другой путь определения прочности бетона в сооружении, наиболее простой, предполагает наличие в распоряжении экспериментатора призм с отношением длина : сторона более 4 : 1, изготовленных из того же бетона, в котором, однако, изменяются параметры, характерные для отклонений в процессе производства работ. Эти призмы испытываются сначала неразрушающим резонансным методом, затем разрушающим с определением прочности при изгибе или при сжатии. Для каждой призмы вычисляется выражение

$$\left(\frac{E_d}{\rho_d}\right)^{1/2} = 2lf_L \quad (3.25)$$

где  $l$  — длина призмы;  $f_L$  — основная частота продольных колебаний.



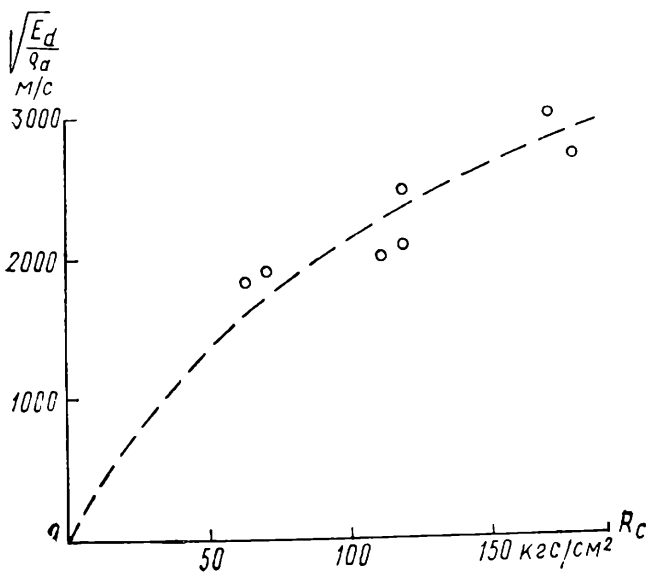


Рис. 3.21. Тарировочная кривая

$$\sqrt{\frac{E_d}{\rho_d}} - R_c$$

Таблица 3.6. Значения соотношения

$\frac{v_D}{v_R}$			
$v_d$	$\beta = \frac{v_D}{v_R}$	$v_d$	$\beta = \frac{v_D}{v_R}$
0	1,62	0,3	1,74
0,05	1,64	0,35	1,76
0,1	1,66	0,4	1,78
0,15	1,68	0,45	1,8
0,2	1,7	0,5	1,81
0,25	1,72	—	—

Изменение левой части выражения (3.25) происходит в зависимости от прочности при изгибе или при сжатии. Таким образом получают определенную тарировочную кривую для бетона, уложенного в дело. Пример такой кривой приведен на рис. 3.21 для бетона фундамента.

Затем проводятся также измерения скорости поверхностной волны в конструкции в соответствии с указаниями, приведенными в первой части этого параграфа. Вычисление на основе этих измерений скорости продольной волны в стержне производится по уравнению

$$v_D = v_R \frac{1,4 (1 + v_d)^{3/2}}{0,87 + 1,12 v_d} \quad (3.26)$$

или по табл. 3.6 через коэффициенты  $\beta$ :

$$v_D = \beta v_R \quad (3.27)$$

Этот метод пересчета скорости поверхностной волны в скорость продольной волны в стержне имеет преимущество, так как меньше зависит от динамического коэффициента Пуассона материала. Для бетона при  $v_d = 0,25$  ошибка в оценке скорости продольной волны  $v_D$  может быть  $\pm 1-2\%$ , если этот коэффициент находится между 0,2 и 0,3.

Значение  $v_D$  непосредственно определяется из ординаты графика по рис. 3.21, поскольку известно, что

$$v_D = \sqrt{\frac{E_d}{\rho_d}} \quad (3.28)$$

Затем определяют требуемую прочность при изгибе или при сжатии. По этому способу трудности, связанные с получением тарировочной кривой, могут быть возмещены высокой точностью значений прочности бетона в со-

оружии. Однако ожидаемое улучшение находится в пределах 4—5% полной ошибки, которая может достигнуть 20—30%, учитывая, что физическая основа метода поверхностной волны остается такой же, как в импульсном методе.

### 3.4.4. Изменение структуры бетона во времени

Большой интерес представляет применение метода поверхностной волны при исследовании процессов твердения и поведения бетона во времени при изменении его структуры.

С этой целью можно рекомендовать значительное увеличение количества дисперсионных кривых, по которым можно определить скорость поверхностной волны.

На рис. 3.22 приведены дисперсионные кривые для разреза дорожного покрытия в возрасте от 20 до 120 суток с момента укладки [12]. Следует отметить непрерывное упрочнение дорожного покрытия под влиянием времени и движения транспорта.

Движение транспорта для покрытий, бедных вяжущим, может иногда привести к разрушению. Такой случай представлен на рис. 3.23 [13], где

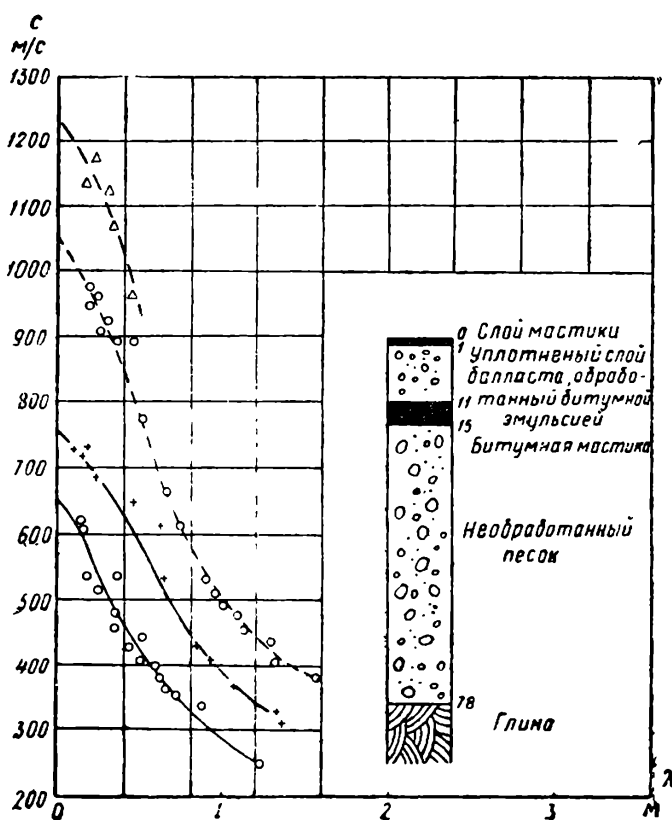


Рис. 3.22. Дисперсионная кривая в процессе твердения

○ — до уплотнения; + — до 20 сут.; ○ — до 57 сут.;  
△ — до 112 сут.

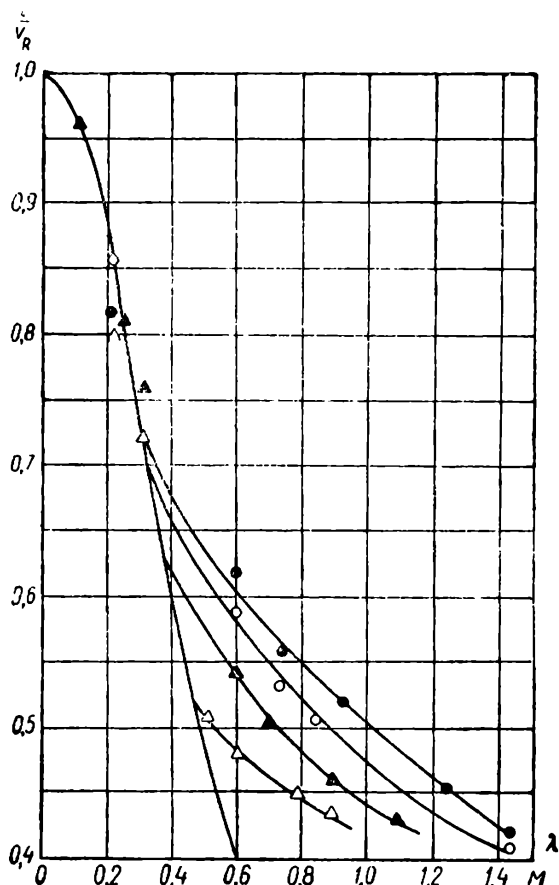


Рис. 3.23. Дисперсионные кривые, снятые в различные сроки после битумизации

● — первое испытание; ○ — второе испытание по истечении 24 мес.; ▲ — третье испытание по истечении 31 мес.; △ — четвертое испытание по истечении 55 мес.

видно, что в поверхностном слое свойства остаются без изменения, а в слое основания, в котором мало вяжущего, развивается активное разрушение под влиянием движения транспорта. Испытания, выполненные на образце, выбранном из дорожного покрытия, подтвердили активное разрушение от потери сцепления в слое основания.

### 3.4.5. Изменение качества бетона на протяженных участках

Другой вид сравнительных измерений заключается в изучении различных свойств на протяженных участках для одного и того же состава бетона в конструкции с целью выявления слабо уплотненных зон. Метод, предложенный для этой цели Джонсом и Мейхью [16], не только пригоден для лабораторных условий и даже считается скоростным. Он заключается в том, что строится дисперсионная кривая для одной зоны плиты. Эта кривая позволяет уточнить толщину плиты, если она неизвестна (см. раздел 3.3 и п. 3.4.6), а также фазовую скорость  $C$ , которая соответствует длине волны  $\lambda$ . Последняя подбирается равной трехкратной толщине плиты. Эта скорость и соответствующая ей частота даются уравнением

$$f = \frac{C}{\lambda} = \frac{C}{3H} \quad (3.29)$$

Установлено, что это именно та частота, которая позволяет получить сведения, относящиеся к материалу по всей его толщине, а не определяется исключительно свойствами поверхностного слоя. Обычно для бетона частоты, соответствующие (3.29), лежат в пределах 1200—1400 *гц*. Измерение длины волны производится непрерывно на участке длиной между 5 и 10 м в соответствии с техническими условиями, приведенными в разделе 3.3. Любое уменьшение длины волны или фазовой скорости является показателем существования слабо уплотненной или поврежденной зоны. На рис. 3.24 представлена фазовая скорость, измеренная в одном направлении на длине около 100 м. Отмечаются слабо уплотненные зоны, в особенности на участках 26—28 и 36—38 м. Измеренное значение фазовой скорости  $C$  может быть пере-

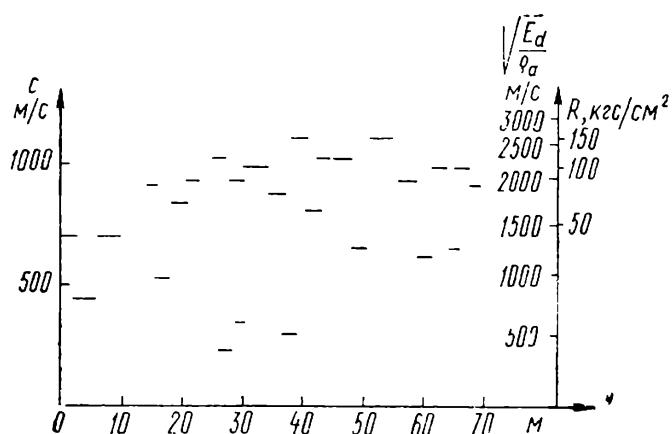


Рис. 3.24. Изменение фазовой скорости в продольном направлении с расположением точек установки приемника по прямой линии

считано в динамический модуль упругости с помощью уравнения, предложенного Джонсом и Мейхью [16]:

$$\left(\frac{E_d}{\rho_d}\right)^{1/2} = C \left(1,23 + 0,7 \frac{\lambda}{H}\right), \quad (3.30)$$

если

$$2 < \frac{\lambda}{H} < 6 \quad (3.31)$$

с допускаемой ошибкой менее 2%. Такое выражение было использовано для получения результатов, приведенных на рис. 3.24. Если существует тарировочная кривая для испы-

тываемого бетона, как указано в п. 3.4.3, можно пересчитать скорость продольной «волны» в прочность по методике, принятой в п. 2.5.10. На рис. 3.24 такое преобразование было выполнено с помощью тарировочной кривой, взятой на рис. 3.21.

Зона с незначительной прочностью, определенная неразрушающим способом испытания бетона, была подтверждена на высверленном образце, испытанном позже.

### 3.4.6. Определение толщины плиты

Определение толщины однослойной плиты было приведено в разделе 3.3. Напомним основные этапы определения [17, 18]:

1) дисперсионная кривая строится для плиты с использованием фазовой скорости  $C$ , вычисленной на основе определения длины волны для различных частот;

2) скорость распространения поверхностной волны определяется с помощью экстраполяции дисперсионной кривой. На ординате графика дисперсионной кривой откладывается шкала по значению  $\frac{C}{v_R}$  вместо значения  $C$ ;

3) толщина плиты вычисляется в зависимости от коэффициента Пуассона испытываемого материала по одному из уравнений (3.11) — (3.14) или по одной из колонок табл. 3.1. В случае применения формул (3.11)—(3.14) значение  $\frac{C}{v_R}$  выбирается между 0,4 и 0,7;

4) среднее значение толщины плиты  $H$  вычисляется исходя из разницы отношений  $\frac{C}{v_R}$ . Из этого следует, что определение толщины многослойной плиты невозможно.

Если разрез дорожного покрытия состоит из двух слоев с весьма близкими упругими свойствами, например слой бетона износа толщиной  $H_1$  и прочный слой бетона толщиной  $H_2$ , и укладка бетона производилась одновременно без разделения каждого слоя, весьма возможно, что толщина  $H$ , измеренная с помощью метода поверхностной волны, будет выражена суммой

$$H = H_1 + H_2. \quad (3.32)$$

Если между свойствами первого и второго слоев бетона существует различие, тогда возможны два случая. В первом рассматривается верхний, более жесткий слой, чем второй, основной. В этом случае очертание дисперсионной кривой представлено на рис. 3.25. Применение отношения  $\frac{C}{v_R}$  со значениями между 0,3 и 0,9, в котором  $v_R$  представляет скорость релеевской волны, фактически измеренную в верхнем слое, позволяет определить толщину  $H_1$  этого слоя.

Если для определения толщины применяется отношение  $\frac{C}{v_R}$  со значениями между 0,5 и 0,8, в котором  $v_R$  — скорость поверхностной волны в ниж-

нем слое, то она определяется экстраполяцией ветви  $B$ , что указывает на снижение отношения  $\frac{C}{v_R}$  снова до значений между 0,3 и 0,55. Величину  $H_2$  получают, используя табл. 3.1, или определяют часть полной высоты  $H$  [19]. Толщина слоя в этом случае

$$H_2 = H - H_1. \tag{3.33}$$

Если нижний слой имеет очень небольшую жесткость по сравнению с верхним слоем и частоты, на которых производятся измерения, невысоки,

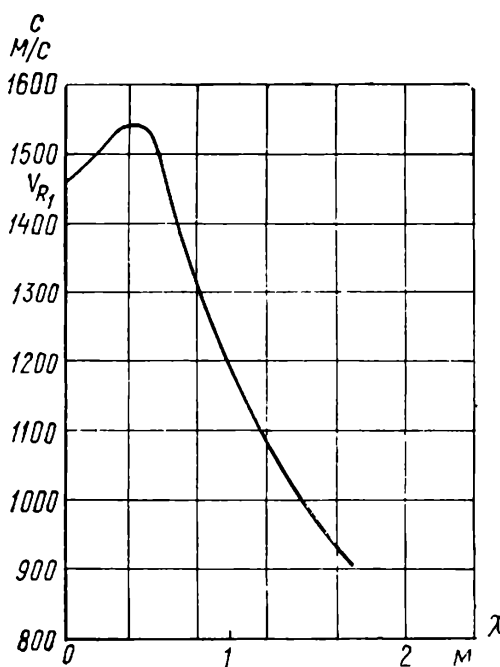
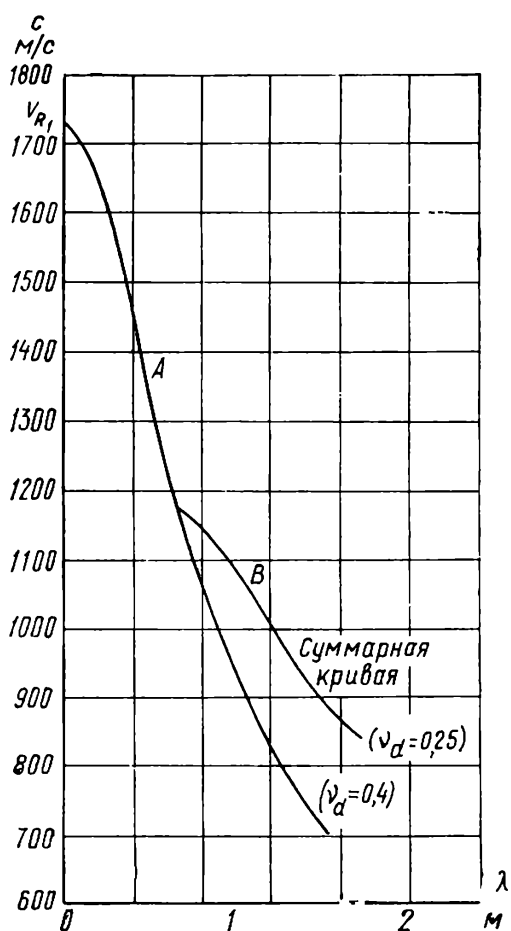


Рис. 3.26. Дисперсионная кривая двухслойной структуры с нижним слоем хорошего качества

Рис. 3.25. Дисперсионная кривая двухслойной структуры с верхним слоем хорошего качества

ветвь  $B$  может отсутствовать, что позволяет измерять в этом случае только толщину верхнего жесткого слоя с помощью кривой  $A$  [20]. Наконец, второй слой может быть более жестким, чем первый, и в этом случае дисперсионная кривая принимает вид, приведенный на рис. 3.26. В этом случае определение толщины  $H_1$  и  $H_2$  усложняется и может производиться только на теоретической основе с использованием расчетных методов. Достаточное хорошее приближение при определении полной толщины  $H$  для двухслойной плиты можно получить также с помощью последовательного рассмотрения нисходящей ветви дисперсионной кривой сначала для соотношений скоро-

сти поверхностной волны  $v_R$ , усредненной среды, затем скоростей поверхностных волн в двух слоях  $v_{R_1}$  и  $v_{R_2}$  в соответствии с формулой

$$v_R = \frac{H_1 v_{R_1} + H_2 v_{R_2}}{H_1 + H_2} . \quad (3.34)$$

Дисперсионная кривая, преобразованная таким образом [относящаяся к значениям (3.34)], позволяет определить толщину плиты  $H$  на основе соотношений (3.11) — (3.14) или же по табл. 3.1 с использованием среднего коэффициента Пуассона для двух слоев. Если значение  $H$  получено и приблизительно равно первоначально предполагаемому  $H = H_1 + H_2$ , тогда толщина  $H$  считается установленной. Если  $H$  не соответствует заданному значению, следует произвести расчет в следующем приближении со значением  $H$  из первого этапа расчета. Таким образом, видно, что это метод последовательного приближения, который основан на подборе первоначального, наиболее правдоподобного значения  $H$ .

#### 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЕРДОСТИ БЕТОНА

В категорию механических методов определения поверхностной твердости включают такие методы, которые определяют прочность бетона на сжатие благодаря существующей зависимости между прочностью на сжатие и поверхностной твердостью бетона. Твердость определяется вблизи поверхности бетона.

В этих методах применяются относительно простые механические приспособления. Специалисты располагают большим количеством приборов и методов. Механические методы поверхностной твердости бетона в любом из вариантов могут обеспечить информацией, касающейся только относительно тонкого слоя вблизи поверхности.

Область применения механического метода поверхностной твердости ограничивается [1, 2]:

предварительными испытаниями, ориентированными на оценку прочности бетона в самой конструкции;

испытанием бетона в раннем и среднем возрасте, определяемом между 3 и 60 сутками, при повышенной марке бетона (выше 300);

участием в комбинированных неразрушающих методах, в особенности в сочетании с такими, которые дают сведения, касающиеся качества бетона глубинных слоев.

Применение механических методов определения поверхностной твердости не допускается:

для зон с местными дефектами при изготовлении;

для бетонов, приготовленных с очень крупным заполнителем (свыше 40 мм);

для бетонов низких марок (ниже 150);

для бетонов в возрасте свыше 60 суток, а также меньше 3 суток;

для зон вблизи скопления арматуры или мест анкеровки предварительно-напряженной арматуры;

для элементов небольшой толщины (обычно менее 10—12 см) по направлению испытания;

для бетонов, в отношении которых имеются сомнения относительно качества поверхностных и глубинных слоев (подверженных замораживанию, воздействию огня и пр.);

для зон невибрированных или плохо вибрированных.

В механических методах поверхностной твердости нельзя рассчитывать на возможность получения сведений, относящихся к слою, расположенному на глубине более 3 см, можно выявить лишь то, что происходит в первой половине слоя (1—1,5 см).

При испытании бетона в позднем возрасте благодаря повышенной карбонизации поверхностного слоя и увеличения его твердости возможна переоценка фактической прочности бетона. Толщина этого слоя составляет 10—20 мм, и удаление его невозможно, что осложняет измерения и создает трудности у оператора.

Запрещение, относящееся к испытаниям бетона низких марок, основывается на том факте, что эти бетоны приготавливаются с пониженным расходом цемента, следовательно, и цементного раствора, который занимает небольшой процент общей площади бетона, и имеется значительный риск, что в испытательных точках вместо пластических деформаций произойдет разрушение бетона или, наоборот, будет учтено влияние только крупного заполнителя.

Следует избегать зон вблизи обычной арматуры и предварительно напряженной арматуры, поскольку бетон в этой зоне имеет повышенную упругость. Это приводит к переоценке фактической прочности бетона.

Имеется еще целый ряд рекомендаций, относящихся к механическому методу поверхностной твердости, а именно:

следует избегать испытания на стороне, являющейся плоскостью укладки материала. Зона, расположенная вблизи этой поверхности, имеет специфические свойства, богата мелкими частицами, имеет большое значение  $V/C$ , подвержена сильному испарению и пр. Предпочтительнее по возможности проводить испытания на боковой поверхности, где устанавливается опалубка, а если это невозможно, нужно удалить поверхностный слой бетона минимум на 1—2 мм по всей поверхности укладки;

испытательные зоны и отдельные точки для испытания располагают на расстоянии 10—12 см от края элемента и в 3—4 см от края образца, что позволит избежать нежелательного эффекта разброса, связанного с различными свойствами удаленных друг от друга участков. Точки испытания располагают на расстоянии 2—3 см друг от друга, избегая взаимного влияния;

выбор точки испытания проверяется во избежание попадания в этом месте крупного заполнителя. Мелкие поры (менее 1 мм), расположенные на поверхности бетона, являются показателем того, что в этом месте имеется раствор.

Поверхность бетона, подлежащего испытанию, необходимо слегка шлифовать для устранения шероховатости.

Механические методы поверхностной твердости бетона делятся на три группы:

- а) основанные на отскоке;
- в) основанные на отпечатке;
- с) основанные на отрыве.

Первые две группы относятся к чисто неразрушающим испытаниям; они представляют собственно методы определения поверхностной твердости бетона. К последней группе относятся методы, разрушающий характер которых очевиден, однако применяют их при небольших местных разрушениях бетона. Методы из этой последней группы основаны на корреляционной зависимости между прочностью сцепления, выдергивания или скалывания и прочностью бетона при сжатии.



## 4.1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ БЕТОНА, ОСНОВАННЫЕ НА ОТСКОКЕ

### 4.1.1. Принцип метода

Движущаяся масса ударяет по поверхности бетона с определенной начальной энергией. В результате удара происходит перераспределение начальной кинетической энергии, а именно: одна часть поглощается бетоном в виде энергии пластической деформации или остаточной, а другая часть передается движущейся массе пропорционально оставшейся части свободной энергии. Чтобы начальная энергия распределялась только между двумя указанными видами энергии, практически масса бетона должна быть бесконечной по сравнению с движущейся массой. Вся начальная энергия или ее часть зависят от относительной массы двух соударяющихся тел, которая вследствие удара преобразуется в бетоне в кинетическую энергию отскока. Требованиям бесконечной массы бетона отвечают крупные элементы, а для удара используют небольшие по массе ударники. Энергию, необходимую для удара, получают с помощью пружин, в результате прямолинейного или кругового движения.

Величина отскока определяется энергией отскока, полученной в результате удара о поверхность бетона, и задается системой пружин, которые регулируют отскок. Измерение отскоков производится с помощью индикатора со стрелкой, на шкале которого нанесены деления; прибор имеет систему торможения, позволяющую отвести пружину до крайнего положения, обеспечив тем самым максимальный удар движущейся массы для заданного угла испытаний. Все устройства для исследования бетона основаны на использовании пружин, обеспечивающих энергию удара, которые должны быть соответственно эталонированы и поддаваться постоянной регулировке по длине.

### 4.1.2. Применяемая аппаратура

Для определения прочности бетона неразрушающим способом, основанным на принципе отскока, наиболее предпочтительным аппаратом является склерометр Шмидта (Швейцария) [5].

В настоящее время фирма Россеф изготавливает три типа склерометров Шмидта с линейной отдачей: тип L с энергией удара 0,075 кгсм для испытания тонких бетонных элементов или бетонов на легком заполнителе; тип M с энергией удара 3 кгсм для испытания массивных бетонных элементов и тип N (рис. 4.1) с энергией удара 0,225 кгсм, пригодный для испытания обычных элементов [6, 7, 8].

Кроме указанных выше линейных типов применяются склерометры типа P (рис. 4.2) с отдачей под углом, которые располагают энергией удара 0,09 кгсм и предназначены, как и склерометры типа L, для испытания легких элементов с небольшими поперечными сечениями или для бетонов очень низких марок [9].

Продольный разрез серийного склерометра типа N изображен на рис. 4.3. Прибор состоит из подвижной массы 14, которая под действием пружин-

ны 16 скользит вдоль направляющего стержня 7, оканчивающегося пружиной 15, находящейся в исходном положении практически прижатой к диску 8, т. е., как показано на рисунке, в состоянии, готовом для удара по поверхности бетона 2 с помощью стержня-бойка 1. В результате удара подвижная масса 14 отскакивает и приводит в движение ползунок 4, который скользит вдоль направляющего стержня и показывает величину отдачи на шкале 5. После удара склерометр снимает давление на бетон под действием пружины 12; направляющая система освобождает стержни 1 и 7, диск 8 и спусковой крючок 13, затем устанавливают ползунок 4 в нулевое положение, и подвижная масса 14 со спусковым крючком 13 движется в исходное положение для подготовки к новому удару. Удар осуществляется с помощью постепенно увеличивающегося давления, создаваемого системой, состоящей из стержней 1 и 7, включая диск 8 и крючок 13, которая растягивает пружину 16 и сжимает пружину 12 до получения контакта с болтом 18. В момент контакта с болтом крючок 13 находится в верхнем положении и освобождает подвижную массу 14, которая начинает двигаться для нового удара по поверхности бетона. Склерометр с затвором 6 имеет преимущество, которое заключается в том, что можно стопорить прибор, как показано на рисунке, тотчас же после удара, избегая нагружения пружины 16. Такое устройство обеспечивает получение четкой величины отдачи. Весь прибор заключен в металлический корпус 3 и закрыт крышками 9 и 11.

Работа прибора периодически контролируется калибровкой. Идеальным способом проверки является проведение 200 ударов по одной эталонной наковальне (рис. 4.4), твердость которой по шкале Бринелля составляет  $500 \text{ кгс/см}^2$ ; наковальня поставляется изготовителем по специальному заказу. В этом случае прибор проверяют при положении сверху вниз, он должен показывать значения

$$n_{\text{этал}} = 80 \pm 2 \text{ деления.} \quad (4.1)$$

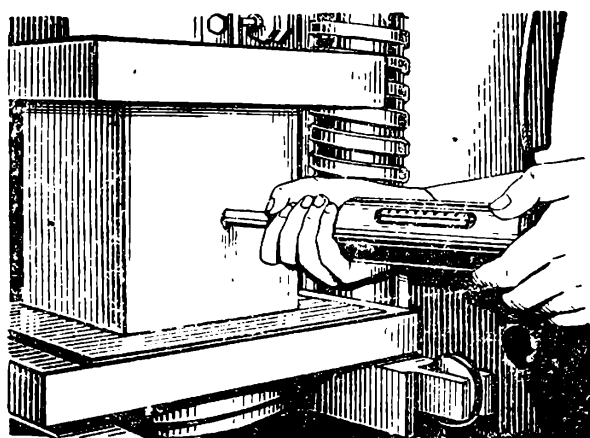


Рис. 4.1. Склерометр Шмидта типа Ч в работе

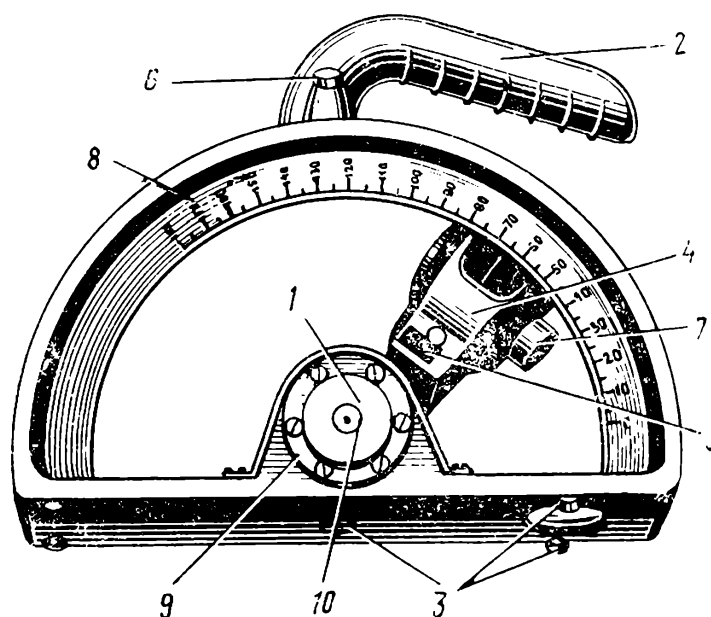


Рис. 4.2. Склерометр Шмидта типа Р

Если отклонение на эталонной наковальне составляет более двух делений или если сравнительные испытания на болванке из любой стали высокой твердости с гладкой поверхностью дают погрешность более 3%, необходима тщательная проверка технического состояния прибора.

Прибор имеет жесткую конструкцию, которая допускает большую маневренность при испытаниях; он стал довольно популярным среди всех типов приборов для измерения прочности бетона механическими методами определения поверхностной твердости.

Уход за прибором заключается прежде всего в чистке. С этой целью все детали, которые подвергаются трению между собой, отделяют, очищают от пыли, направляющий стержень смазывают тонким слоем масла высокого качества.

Проверку правильного функционирования индикатора можно производить путем демонтажирования смотрового окошка 5 и подвески к ползунку крючка из тонкой проволоки. Нагружать ползунки нужно до тех пор, пока он не начнет двигаться. Если это движение происходит в интервале 50—80 г, то состояние индикатора считается нормальным.

Если после чистки погрешность показаний прибора превышает 3%, пружину 16 дополнительно растягивают (рис. 4.3). Для этого извлекают крышку пружины 16 из углубления, в котором она находилась, и передвигают на одно или несколько углублений дальше, чтобы пружина была более растянутой.

После нескольких таких перемещений достигают предельного растяжения пружины. В этом случае можно продолжать работать со склерометром до тех пор, пока отклонения не станут равными 6% первоначальной величины отскока при калибровке. Фактическую величину отсчета на приборе  $n_{ef}$  необходимо корректировать в зависимости от отношения между начальной величиной отсчета при калибровке  $n_{et, i}$  и фактической величиной  $n_{et, ef}$  согласно соотношению

$$n = n_{ef} \frac{n_{et, i}}{n_{et, ef}} \quad (4.2)$$

Рис. 4.4. Калибровка склерометра

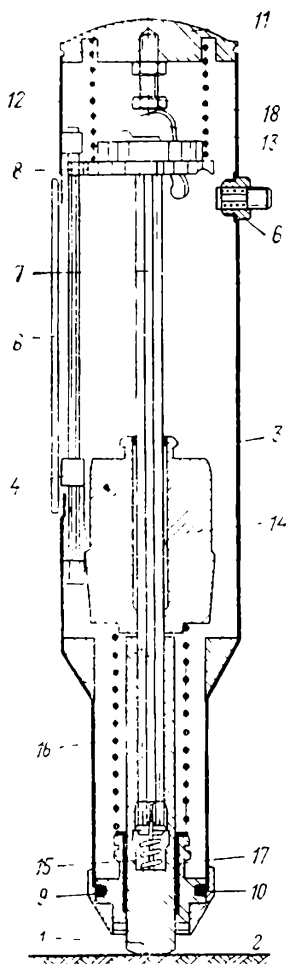
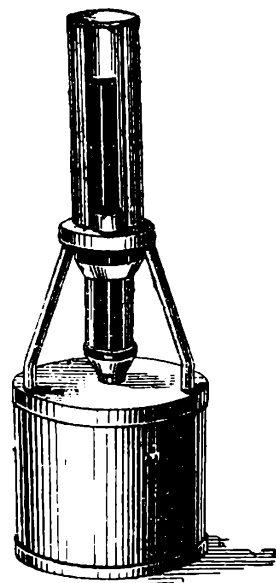


Рис. 4.3. Склерометр Шмидта типа N

Если отклонение превысит 6%, испытания нельзя продолжать без замены пружины 16 или замены склерометра.

Склерометр типа Р состоит из балансира 4, имеющего ударник 7 с кривой поверхностью, и рычага остановки балансира в требуемом положении 5 (см. рис. 4.2). Этот рычаг автоматически разъединяется после каждого удара и допускает четкое прочитыва-

ние зарегистрированного отскока. Величина отскока определяется по шкале 8 в условных единицах. Прибор снабжен устройством 1, закрепленным в кольце 9, которое насажено на ось 10. Устройство 1 позволяет передавать дополнительную энергию балансиру действием пружины в то время, когда испытывается горизонтальная поверхность. Удар прекращается с помощью кнопки 6. Для установки прибора в необходимое положение пользуются рукояткой 2.

В последнее время изготовитель предлагает усовершенствованные или специальные типы склерометров, а именно:

тип NA ( $E = 0,225 \text{ кгсм}$ ) применяется для контроля качества бетона в конструкциях под водой;

тип NR ( $E = 0,225 \text{ кгсм}$ ) аналогичен типу N, но дополнительно снабжен приспособлением для регистрации измерений;

тип LB ( $E = 0,075 \text{ кгсм}$ ) — один из вариантов типа L, применяется для неразрушающего контроля изделий из обожженной глины и кирпича;

тип PT ( $E = 0,09 \text{ кгсм}$ ) имеет уширенную головку балансира для контроля качества материалов с очень малой прочностью ( $R = 5 \div 80 \text{ кгс/см}^2$ ).

### 4.1.3. Испытания

Перед испытанием бетона с помощью склерометра следует выбирать зоны и соответствующую поверхность бетона [10]. Та часть поверхности бетона, которая находится со стороны опалубки, будет, очевидно, иметь преимущество при подготовке к испытаниям с точки зрения как четкости подготовки самой поверхности, так и получения надежных результатов. Испытания, проводимые со стороны укладки, приводят к недооценке фактической прочности бетона. По мотивам, которые легко себе представить, эта зона может оказаться зоной элемента максимально нагруженной.

Участок, выбранный для испытания, должен иметь площадь  $400 \text{ см}^2$  ( $20 \times 20 \text{ см}$ ). Участок бетона перед испытаниями необходимо обработать шлифовальным камнем. После шлифования поверхности с этого участка следует сдуть каменную пыль. Рекомендуются удалять слой бетона толщиной 10 мм, если поверхность его не пригодна для работы со склерометром.

В границах намеченной зоны выполняют 6—10 измерений. Нельзя проводить испытания на участках как с дефектной поверхностью, так и с крупным заполнителем. Участки для испытания считаются нормальными, когда на поверхности бетона находится заполнитель диаметром до 7 мм.

Участки с крупным заполнителем исключаются при испытании в соответствии с критерием выбора участка по данным предварительной обработки [10].

При испытаниях в одной зоне исключаются те значения отскока, которые отличаются больше, чем на пять делений от минимальных значений. Затем выполняют еще пять или более измерений, после которых определяют средние предварительные значения. Если результаты, исключая предварительные значения, отличаются не больше чем на четыре деления от средних предварительных значений, то в этом случае окончательными значениями являются последние.

Порядок испытания склерометром при линейной отдаче следующий: склерометр включается легким нажимом стержня-бойка 1 на поверхность бетона (см. рис. 4.3), давление производится медленно и равномерно до тех пор, пока подвижная система не достигнет конца хода. Ось склерометра во время этого испытания должна быть перпендикулярна поверхности бетона. В этом варианте испытания взят случай, когда вертикальная бетонная поверхность примыкала к опалубке, а ось склерометра расположена в горизонтальном положении, поэтому нет необходимости проверять угол установки прибора.

В момент, когда будет достигнут конец свободного хода, крючок 13 надавит на головку болта 18 и освободит подвижную массу 14, которая переместится по направляющему стержню 7 и ударит по концу бойка 1. Боек передает удар на бетонную поверхность 2 и деформирует ее, расходуя одну часть энергии на остаточную деформацию и тепло, другая часть этой энергии передается в виде упругой деформации стержня и возвращается подвижной массе 14, которая вновь скользит вдоль стержня 7, однако на этот раз в обратном направлении, увлекая за собой ползунок 4. Удар осуществляется под действием пружины 16.

Корректировка за счет угла установки оси прибора представляет собой количество делений, на которое увеличивается фактический отсчет, когда испытание производится на плоскости, не являющейся вертикальной, для того чтобы получить эквивалентные измерения для вертикальной поверхности. Эти значения положительные, когда давление производится сверху вниз, и отрицательные при давлении снизу вверх.

Для склерометров типов L и N за основу принимается горизонтальная поверхность: для давления сверху вниз поправка изменяется в пределах +3 и +4, а для давления снизу вверх — в пределах —3 и —4.

Для склерометра типа P испытание обычно производят на вертикальной поверхности. Если испытания проводятся на верхней стороне горизонтального элемента (сверху вниз), выключение ударов производится при отскоке 75 делений под действием исполнительной пружины, а поправки вводятся в зависимости от значений отскока в пределах делений от 0 до —4.

#### 4.1.4. Определение прочности бетона при сжатии

Как уже говорилось, основное применение механических методов определения поверхностной твердости бетона заключается в определении прочности на сжатие.

Следует напомнить, что не рекомендуется применять этот метод там, где имеются сомнения относительно соответствия между качеством бетона в поверхностной зоне и в глубине массива (бетоны, подвергающиеся воздействию мороза, огня и пр.).

Имеется и здесь, как и в ультразвуковом импульсном методе, много источников погрешностей и приемов повышения точности результатов.

Используются различные методы преобразования измеренных отскоков в прочность при сжатии:

метод тарировочной кривой;

метод скорректированных коэффициентов влияния;

метод нескорректированных коэффициентов влияния;  
метод единой тарировочной кривой.

В дальнейшем кратко излагается принцип каждого метода и область его применения, а также и соответствующая точность.

**4.1.4.1. Метод тарировочной кривой.** Метод применим на заводах, где в производстве используются относительно известные материалы и где опытные образцы могут изготавливаться в большом количестве. Тарировочная кривая вычерчивается по результатам неразрушающих и разрушающих испытаний минимум на 30 кубах, сторона которых не должна быть меньше 15 см. Кубы должны находиться в таких же условиях твердения, как и бетон для изготовления сборных элементов. Тарировочную кривую нельзя построить, если значения показателей отскока и прочности, полученные на кубах, оказываются неизменными.

Если изменения качества бетона в сборных элементах вызваны действительными причинами, связанными с условиями изготовления, то никакие коррективы состава бетона для тарировочных образцов не требуются. Однако если причины изменения качества иные, то рекомендуется использовать разные отношения  $V/C$ .

При неразрушающих методах испытаний кубов принимаются 6—10 точек, расположенных минимум в 3 см от ребра и минимум в 2 см друг от друга; точки намечаются со стороны опалубки, в то время как куб закреплен между плитами пресса и подвержен напряжению минимум  $5 \text{ кгс/см}^2$ . Не допускаются испытания бетона с крупным заполнителем в соответствии с указаниями п. 4.1.3 и проведение вычисления среднего показателя отскока.

Если испытания склерометром на конструктивных элементах необходимо производить со стороны укладки бетона, тогда неразрушающие испытания также ведут со стороны укладки.

После окончания неразрушающих испытаний кубов они подвергаются стандартным испытаниям на прессе с замедленной скоростью нагружения. Полученные результаты наносят на график, в котором по оси ординат откладывают предел прочности при сжатии, по оси абсцисс — средний показатель отскока на один куб (рис. 4.5). Путем испытаний 25—30 кубов получают множество различных точек, разбросанных в интервале, достаточно широком для отскока и прочности. Кривая вычерчивается по данным значений, полученных экспериментальным путем, например с помощью сетки мелких квадратов. Кривая, полученная таким путем, действительна для всех бетонов аналогичной марки, приготовленных на заводе в тех же условиях и соответствующего возраста [11].

Тарировочную кривую необходимо проверять каждый раз, когда изменяется состав бетона или режим термообработки, и не менее одного раза в месяц. Количество кубов для контроля должно быть не менее 3, а при изменении состава бетонной смеси — не менее 10.

Точность оценки при определении прочности бетона в сборных элементах с помощью метода отскока и тарировочной кривой должна быть в пределах 20—25%.

**4.1.4.2. Метод нескорректированных коэффициентов влияния.** Если нет возможности собрать в одном месте 20—30 образцов для использования их при построении тарировочной кривой и нет даже трех образцов для провер-

ки соотношения «показатель отскока — прочность при сжатии», но существуют данные, относящиеся к составу испытываемого бетона, как-то: вид и дозировка цемента, тип заполнителя, зрелость и влажность бетона в момент испытания [12], то эти сведения достаточны для того, чтобы сделать вывод о соотношении «отскок — прочность».

Порядок действий следующий. В качестве исходного бетона берется бетон стандартного состава, который характеризуется следующими данными:

цемент: разновидность портландцемента (P400, PZ400, M400, RIM200, RIM300), дозировка  $300 \text{ кг/м}^3$ ;

заполнитель — речной кварцевый песок, кварцит;

коэффициент зрелости: 1000, определенный по уравнению

$$f = \sum_{i=1}^n (\theta_i + 10) t_i \quad (4.3)$$

и выраженный в градусах Цельсия, помноженных на количество суток;

$t_i$  — искомый интервал в сутках при равномерной температуре  $\theta_i$ ;

влажность, соответствующая хранению в течение 6 суток под водой и 21 суток на открытом воздухе с относительной влажностью 40—60 %. Эта влажность соответствует условиям твердения бетона в массивном конструктивном элементе.

Для такого бетона существует уравнение в общем виде «показатель отскока — прочность при сжатии»:

$$R = an^b, \quad (4.4)$$

где  $a$  и  $b$  — постоянные, которые в частном случае имеют вид

$$R = 0,09 n^{2,27} \text{ кгс/см}^2; \quad (4.5)$$

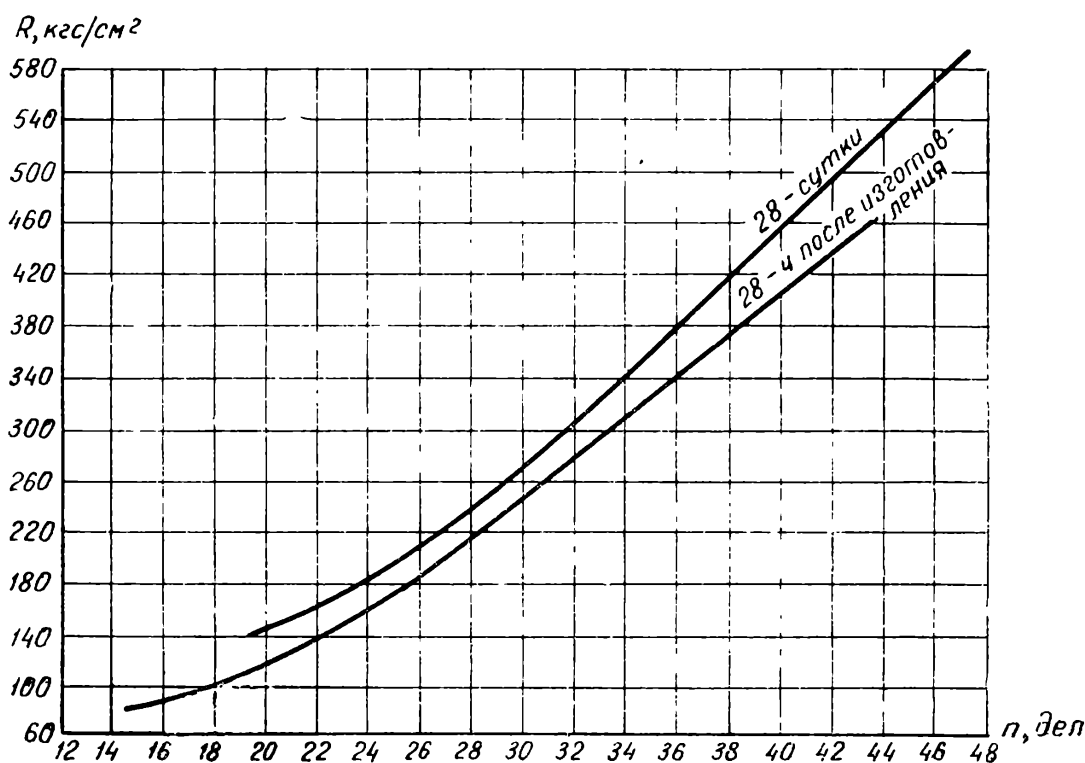


Рис. 4.5. Тарировочная кривая  $R-n$  для кубов заводского изготовления

для предельных значений получим

$$\begin{cases} n=20; \\ R=83 \text{ кгс/см}^2 \end{cases} \quad \begin{cases} n=40; \\ R=400 \text{ кгс/см}^2. \end{cases} \quad (4.6)$$

Кривые, полученные по уравнению (4.5), воспроизведены на рис. 4.6 по данным значений, содержащихся в табл. 4.1, для коэффициента  $C_t = 1,00$  (в графе 6). Если бетон, подлежащий испытанию, отличается от исходного бетона стандартного состава одной или несколькими характеристиками, тогда вычисляют общий коэффициент влияния для испытываемого бетона  $C_t$  из уравнения

$$C_t = C_c C_d C_a C_m C_u, \quad (4.7)$$

где  $C_c$  — коэффициент влияния вида цемента;  $C_d$  — коэффициент влияния дозировки цемента;  $C_a$  — коэффициент влияния типа заполнителя;  $C_m$  — коэффициент влияния возраста и условий твердения бетона;  $C_u$  — коэффициент влияния влажности бетона.

Таблица 4.1. Определение прочности бетона методом отскока (N)

n	Прочность при сжатии бетонов различного состава								
	$C_t (C_{t'}) = 0,6$	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	$\frac{26}{41}$	$\frac{30}{48}$	$\frac{34}{55}$	$\frac{39}{62}$	$\frac{43}{69}$	$\frac{47}{76}$	$\frac{52}{83}$	$\frac{56}{90}$	$\frac{60}{97}$
	$\frac{38}{61}$	$\frac{44}{71}$	$\frac{50}{81}$	$\frac{57}{91}$	$\frac{63}{101}$	$\frac{69}{111}$	$\frac{76}{121}$	$\frac{82}{131}$	$\frac{88}{141}$
20	$\frac{50}{75}$	$\frac{58}{88}$	$\frac{66}{100}$	$\frac{75}{113}$	$\frac{83}{125}$	$\frac{91}{138}$	$\frac{100}{150}$	$\frac{108}{163}$	$\frac{116}{175}$
	$\frac{63}{90}$	$\frac{74}{104}$	$\frac{84}{119}$	$\frac{94}{134}$	$\frac{105}{149}$	$\frac{116}{164}$	$\frac{126}{179}$	$\frac{137}{194}$	$\frac{147}{209}$
24	$\frac{76}{105}$	$\frac{89}{123}$	$\frac{102}{140}$	$\frac{114}{158}$	$\frac{127}{175}$	$\frac{140}{193}$	$\frac{152}{210}$	$\frac{165}{228}$	$\frac{178}{245}$
	$\frac{92}{122}$	$\frac{107}{143}$	$\frac{123}{163}$	$\frac{138}{184}$	$\frac{153}{204}$	$\frac{168}{224}$	$\frac{184}{245}$	$\frac{199}{265}$	$\frac{214}{286}$
28	$\frac{107}{139}$	$\frac{126}{162}$	$\frac{143}{186}$	$\frac{161}{209}$	$\frac{179}{232}$	$\frac{197}{255}$	$\frac{215}{279}$	$\frac{233}{302}$	$\frac{251}{325}$
	$\frac{125}{158}$	$\frac{146}{185}$	$\frac{166}{211}$	$\frac{187}{238}$	$\frac{208}{264}$	$\frac{229}{291}$	$\frac{250}{317}$	$\frac{271}{343}$	$\frac{291}{370}$
32	$\frac{144}{179}$	$\frac{168}{209}$	$\frac{192}{238}$	$\frac{216}{268}$	$\frac{240}{298}$	$\frac{264}{328}$	$\frac{288}{358}$	$\frac{312}{388}$	$\frac{336}{417}$
	$\frac{164}{200}$	$\frac{192}{234}$	$\frac{219}{268}$	$\frac{247}{303}$	$\frac{274}{334}$	$\frac{301}{368}$	$\frac{329}{401}$	$\frac{356}{434}$	$\frac{384}{468}$



n	Прочность при сжатии бетонов различного состава								
	$C_t (C_t') = 0,6$	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
36	186	218	249	280	311	342	374	405	435
	222	260	296	334	371	408	445	482	520
38	212	248	283	319	354	389	425	460	495
	246	286	328	368	409	450	490	532	573
40	240	280	320	360	400	440	480	512	560
	268	313	358	402	447	492	537	582	626
42	269	314	359	404	449	494	539	583	629
	280	338	386	445	494	543	581	629	678
44	311	351	402	452	502	552	602	653	703
	336	395	448	506	560	616	672	728	784
46	329	385	439	494	550	605	660	715	770
	361	421	481	542	602	662	722	782	842
48	363	424	484	545	607	666	727	788	848
	392	458	523	588	654	719	785	851	917
50	399	465	532	598	665	731	797	864	930
	430	502	573	645	716	786	860	932	1001
52	435	507	580	652	726	798	871	943	1015
	464	542	618	696	775	850	928	1005	1083
54	477	556	636	715	796	876	955	1033	1113
	510	595	680	765	851	937	1020	1105	1290
56	522	609	696	783	871	957	1045	1130	1215
	555	647	740	832	925	1015	1110	1202	1295

Примечание. Над чертой приведены значения прочности для  $C_t$ , под чертой — для  $C_t'$  [см. формулы (4.7) и (4.8)].

Использование произведения (4.7), в котором каждый из множителей был получен на основе изменения по одному параметру в составе бетонной смеси, основано на предположении, что имеет силу принцип наложения.

Влияние вида цемента представлено на рис. 4.7 и в табл. 4.2.

Влияние дозировки цемента приведено на рис. 4.8. Мы видим, что прочность, соответствующая определенному показанию отскока, тем больше, чем больше дозировка цемента. Отношение прочности бетона с различной дозировкой цемента к соответствующему показанию отскока выражает коэффициент влияния дозировки. Принятые коэффициенты для этих значений представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.2. Коэффициент влияния вида цемента

Цемент	$C_c$
P400, PZ400, RIM200, RIM300, C400, M400 . . . . .	1
F250 . . . . .	0,9

Таблица 4.3. Коэффициент влияния дозировки цемента

Дозировка в кг/м <sup>3</sup>	$C_d$
100 . . . . .	0,67
200 . . . . .	0,85
300 . . . . .	1
400 . . . . .	1,12
500 . . . . .	1,24

В связи с влиянием вида заполнителя можно утверждать, что чем заполнитель тяжелее, тем значения отскока и соответствующая ему прочность будут меньше <sup>1</sup>. Для бетонов с кварцевым речным заполнителем этот коэффициент имеет значение  $C_a = 1$ , а для других заполнителей его необходимо определять испытаниями.

Другим фактором влияния являются возраст и условия твердения бетона. Известно, что с увеличением возраста бетона происходит карбонизация у поверхности под действием углекислоты из воздуха. Углекислота.

<sup>1</sup> С увеличением плотности заполнителя увеличивается его модуль упругости и снижаются демпфирующие свойства, а значит высота отскока, наоборот, должна увеличиваться (примеч. науч. ред.).

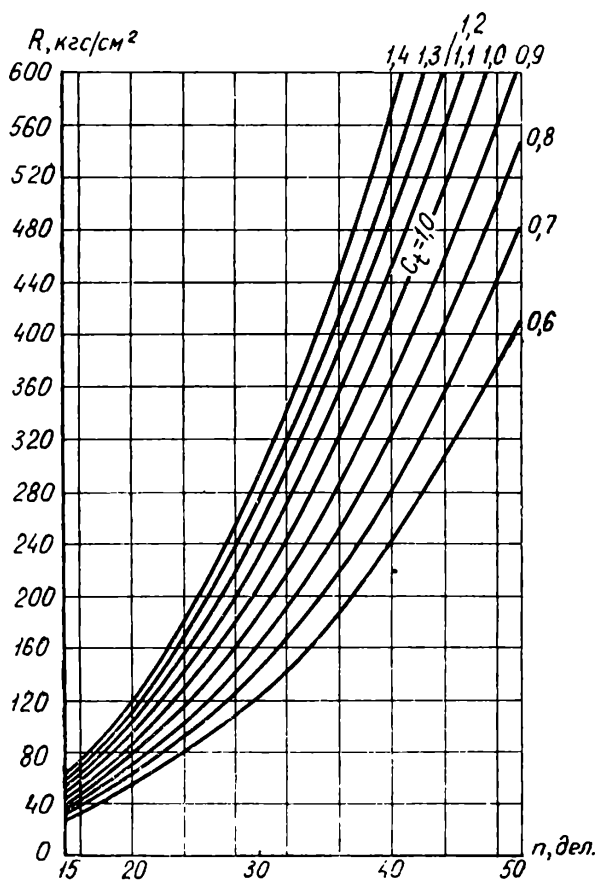


Рис. 4.6. Семейство тарировочных кривых для бетона, хранившегося на воздухе

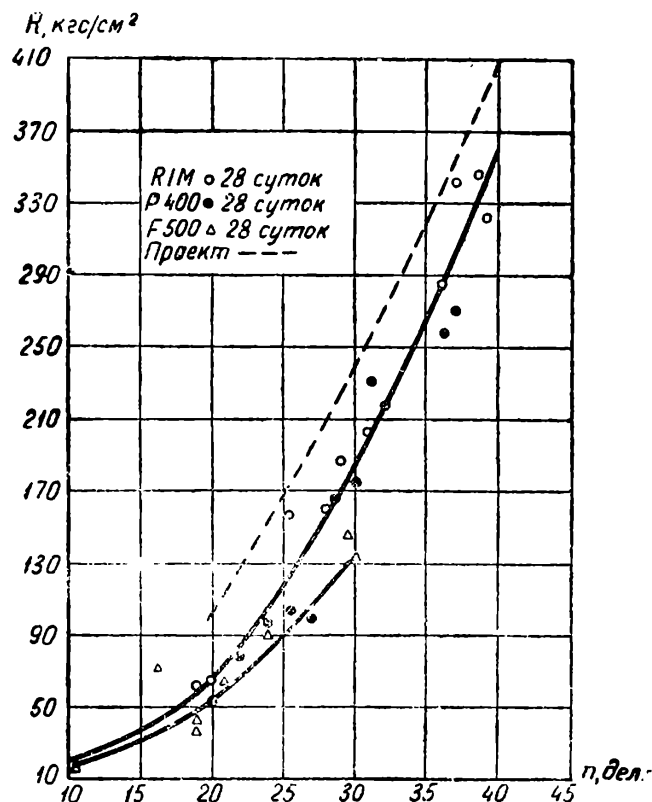


Рис. 4.7. Влияние вида цемента на зависимость  $R-n$

реагирует с окисью кальция и образует химическое соединение в бетоне в виде углекислого кальция. Влияние этого воздействия на зависимость между показаниями отскока и прочностью бетона показано на рис. 4.9.

По мере созревания бетона прочность, соответствующая определенному показанию отскока, снижается [3]. Если взять прямое отношение значения прочности соответствующего бетона к коэффициенту зрелости 1000, тогда бетон с другой степенью зрелости при таком же показании отскока будет иметь прочность с поправкой по табл. 4.4. Эти значения выражают коэффициент влияния зрелости бетона.

Не рекомендуется проводить испытания бетона с коэффициентом зрелости больше 40 000 [13]. Последний фактор, который не рассматривался, — влажность бетона. Он является наиболее важным и более сложным, чем предыдущие, поскольку обнаруживается разное равновесное состояние при одинаковых показаниях отскока. Воздействие влажности показано на рис. 4.10, где мы видим разницу, относительно большую для показаний отскока небольшой величины и незначительную по мере того, как величина показания отскока увеличивается. Если взять отношение прочности бетона, хранившегося в условиях, предписанных в начале данного параграфа (т. е. 1 + 6 + 21 сутки), тогда прочность бетона при другой влажности и разных показаниях отскока по отношению к прочности бетона стандартного состава при таких же показаниях отскока определяется в соответствии с данными, приведенными в табл. 4.5.

Таблица 4.4. Коэффициент влияния зрелости бетона

Зрелость бетона °С × сутки	$C_m$
300 . . . . .	1,06
1000 . . . . .	1
6000 . . . . .	0,92
36 000 . . . . .	0,8

Таблица 4.5. Коэффициент влияния влажности

Влажность	$C_u$	
	$n=20$	$n=40$
Насыщенная (под водой) . . . . .	1,52	1,12
Нормальная . . . . .	1	1
Воздушно-сухая . . . . .	0,94	0,96

Для испытания насыщенных водой бетонов рекомендуется применять вместо коэффициента  $C_t$ , который изменяется в зависимости от показаний отскока, коэффициент  $C'_t$ , определяемый из уравнения

$$C'_t = C_c C_d C_a C_m, \quad (4.8)$$

который не зависит от показаний отскока. Влияние влажности наносится дифференцированно прямо на основную кривую ( $C'_t = 1$ ), которая определена в табл. 4.1 в графе 1 по линии  $C'_t$  или по рис. 4.11.

Прочность испытываемого бетона определяется по формуле

$$R_{ef} = R_{\text{станд}} C_t, \quad (4.9)$$

если бетон в сухом состоянии, и по формуле

$$R_{ef} = R'_{\text{станд}} C'_t, \quad (4.10)$$

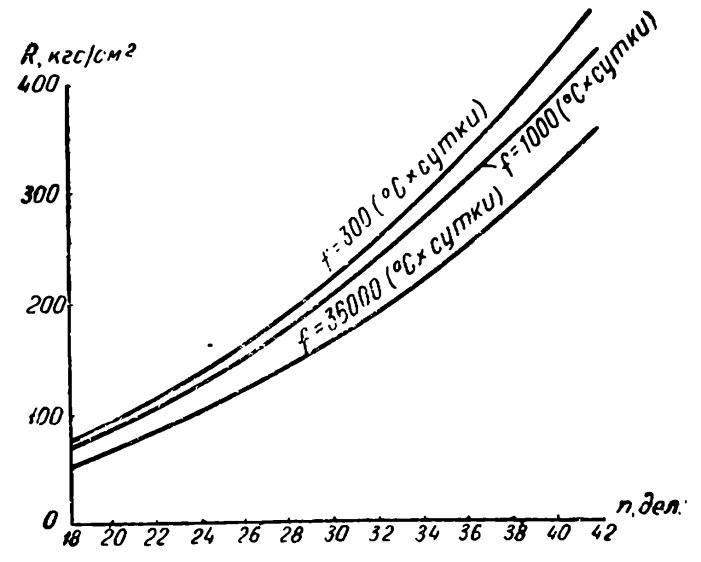
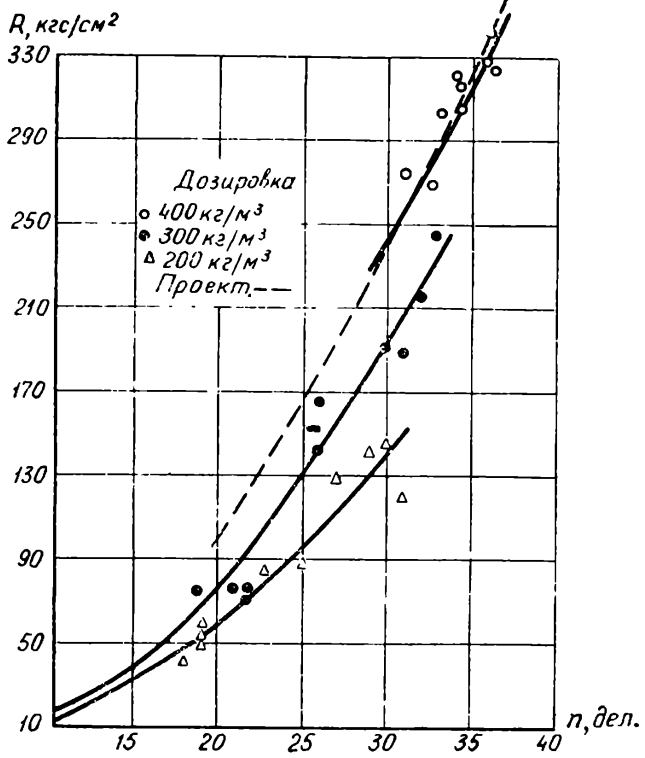


Рис. 4.9. Влияние возраста бетона на зависимость  $R-n$

Рис. 4.8. Влияние дозировки цемента на зависимость  $R-n$

Рис. 4.11. Кривая преобразования  $C'_t = 1$  для насыщенного водой бетона

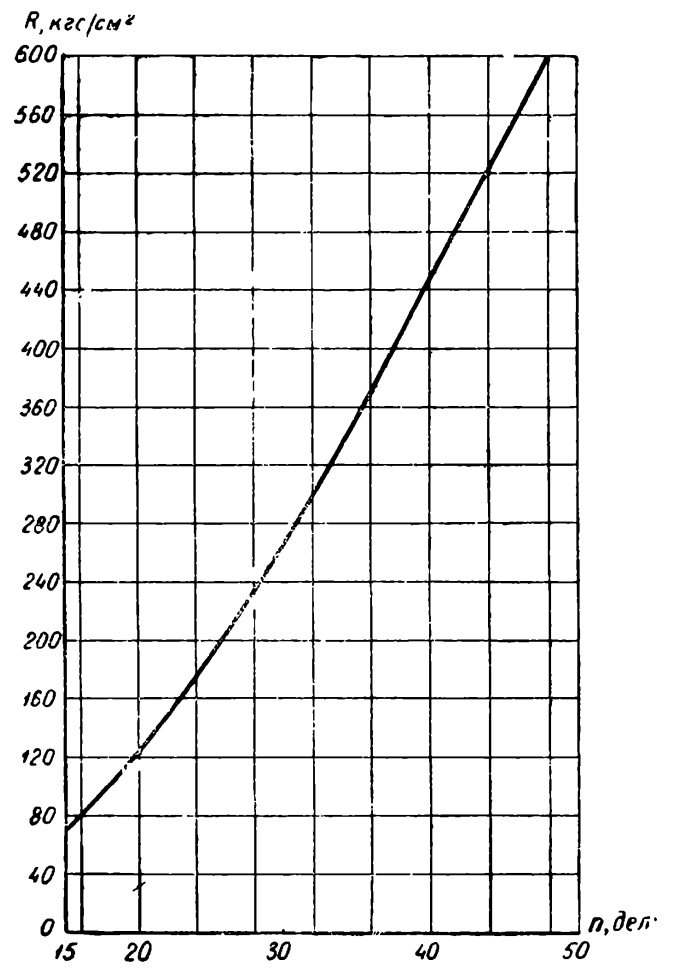
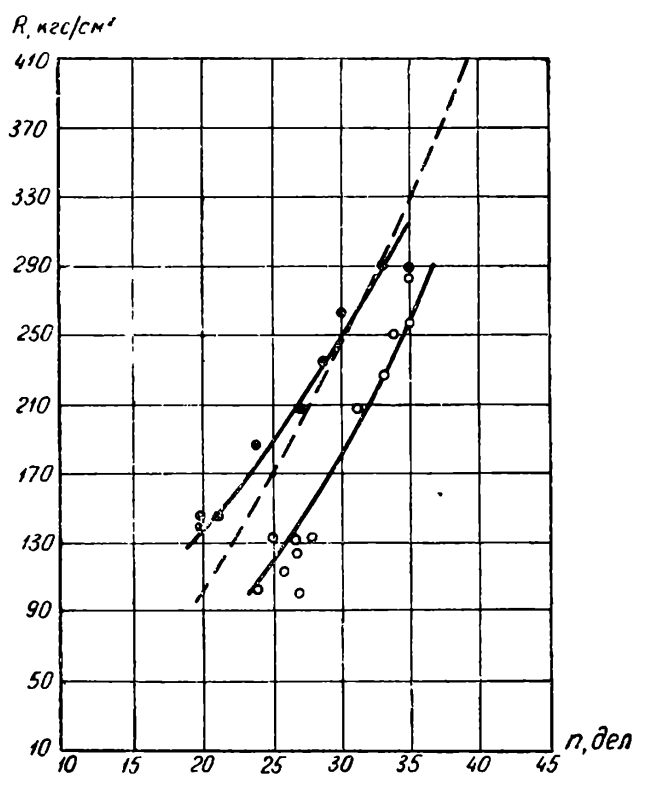


Рис. 4.10. Влияние влажности бетона на зависимость  $R-n$  ○ — бетон, хранившийся на воздухе 28 сут; ● — бетон, хранившийся в воде 28 сут

если бетон в насыщенном состоянии. В уравнениях (4.9) и (4.10)  $R_{\text{станд}}$  и  $R'_{\text{станд}}$  представляют собой прочность стандартного бетона сухого или влажного. Произведения, содержащиеся в формулах (4.9) и (4.10), приведены в табл. 4.1 для разных значений общего коэффициента влияния  $C_t$  или  $C'_t$ . Если влажность бетона имеет промежуточное значение между предельными состояниями: сухим и насыщенным, производится интерполяция между значениями числителя и знаменателя дроби, приведенной в табл. 4.1. Если влажность меньше, чем у стандартного бетона, можно воспользоваться общим коэффициентом  $C_u$ , приведенным в табл. 4.5.

Испытание бетона значительного возраста методом поверхностной твердости может привести к определенному риску, поскольку возникает опасность переоценки прочности бетона, которая не может быть проверена с помощью коэффициентов влияния и достигает 50% [14].

Точность определения прочности бетона методом коэффициентов влияния оценивается в пределах  $\pm 30\text{--}40\%$ .

Имеется еще много случаев, когда влияние различных факторов, не вошедших в величину  $C$ , сказывается на результатах испытаний, поэтому необходимо в этих случаях осуществлять корреляцию между качеством бетона и поверхностной твердостью, что позволяет получить более точные данные [15].

**4.1.4.3. Метод скорректированных коэффициентов влияния.** Возможен случай, когда в момент испытания бетона, взятого во время производства работ, располагают определенным количеством образцов, обычно тремя, приготовленных в таких же условиях, что и при производстве бетонных работ, без изменения какого-либо параметра в составе во время укладки в конструкцию.

В этом случае производятся неразрушающие испытания каждого куба в 6—10 точках (см. п. 4.1.4.1). Определяется прочность бетона стандартного состава  $R_{ci}^{\text{станд}}$  для среднего показания отскока, одинакового с измеренным на  $i$ -том кубе. Затем куб подвергается разрушающему испытанию на прессе и результаты вычисляются по формуле

$$C_{ti}^{\text{эксп}} = \frac{R_{ci}^{\text{эксп}}}{R_{ci}^{\text{станд}}}, \quad (4.11)$$

где  $R_{ci}^{\text{эксп}}$  — прочность, полученная на прессе и измеренная на  $i$ -том кубе.

Вычисляется среднее значение экспериментального коэффициента влияния  $C_t^{\text{эксп}}$  для  $n$ -го количества кубов:

$$C_t^{\text{эксп}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ti}^{\text{эксп}}}{n}. \quad (4.12)$$

Значение общего экспериментального коэффициента влияния, полученного по формуле (4.12), сопоставляется с частным коэффициентом влияния, по-

лученным на основании вычислений и обозначенным  $C_t^{\text{выч}}$ , в соответствии с п. 4.1.4.2. В этом случае мы имеем

$$\text{а) } \frac{C_t^{\text{выч}} - C_t^{\text{эксп}}}{C_t^{\text{эксп}}} < 10\% . \quad (4.13)$$

Совпадение принимается как очень хорошее и любое из значений  $C_t^{\text{эксп}}$  или  $C_t^{\text{выч}}$  считается окончательным;

$$\text{б) } 10\% \leq \frac{|C_t^{\text{выч}} - C_t^{\text{эксп}}|}{C_t^{\text{эксп}}} \leq 40\% . \quad (4.14)$$

Совпадение еще довольно удовлетворительное, однако окончательный общий коэффициент влияния должен быть средней величиной этих двух коэффициентов;

$$\text{в) } \frac{|C_t^{\text{выч}} - C_t^{\text{эксп}}|}{C_t^{\text{эксп}}} > 40\% . \quad (4.15)$$

Совпадение совершенно неудовлетворительное, и необходимо найти причины этого несоответствия.

Точность определения прочности бетона, взятого во время производства работ методом скорректированных коэффициентов влияния, зависит от результатов сопоставления расчетных коэффициентов влияния и экспериментальных, а именно:

в случае «а» точность метода  $\pm 20—25\%$ ;

в случае «б» точность метода  $\pm 25—30\%$ ;

в случае «в» точность метода  $\pm 30—40\%$ .

**4.1.4.4. Метод единой тарировочной кривой.** Если состав и другие характеристики бетона, влияющие на зависимость «отскок — прочность при сжатии», неизвестны, то применяется единая тарировочная кривая. В таком случае принимаются ограниченные требования для испытания, но более строгие, чем в случае использования кривой, выбранной с использованием коэффициентов влияния. Такого вида тарировочная кривая встречается в описании приборов и в технических условиях различных стран.

Для склерометра типа N на рис. 4.12 приведено семейство тарировочных кривых, рекомендуемых в разных странах. Отмечается их относительный характер группирования, а также то, что в число кривых входят кривые, предусмотренные румынскими указаниями для стандартного бетона в сухом и насыщенном состояниях.

Тарировочные кривые для склерометра типа L, в которых учитываются угловые поправки, приведены на рис. 4.13. Иногда появляется необходимость применения метода коэффициентов влияния при измерениях, выполненных склерометром типа L. Для выполнения этой работы было установлено следующее эквивалентное соотношение между измерениями этими двумя склерометрами [16]:

$$S_N = S_L + 5,5, \quad (4.16)$$

где  $S_N$  — показание отскока склерометра типа N;  $S_L$  — измеренное показание отскока склерометром типа L (обе величины в условных делениях шкалы).

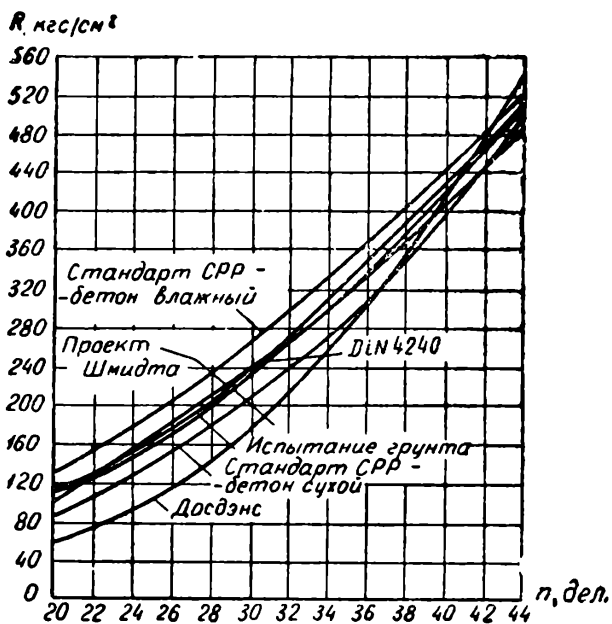


Рис. 4.12. Семейство кривых «величина отскока — прочность бетона при сжатии»

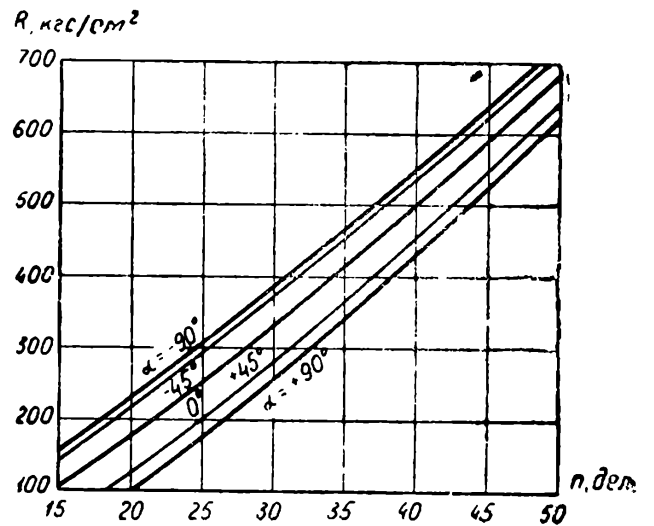


Рис. 4.13 Семейство кривых для склерометра типа L

В соответствии с рекомендациями фирмы — изготовителя прибора — единая тарировочная кривая не применяется в следующих случаях:

- заполнитель искусственный;
- заполнитель мокрый, легкий или дробленый;
- гравий очень гладкий, полированный;
- заполнитель немыйтый, прилипающий к глине;
- бетоны, бедные цементом или недостаточно уплотненные;
- бетон свежеприготовленный или бетон подводный;
- бетон старый и сухой вследствие карбонизации поверхности;
- бетон низких марок (ниже 200).

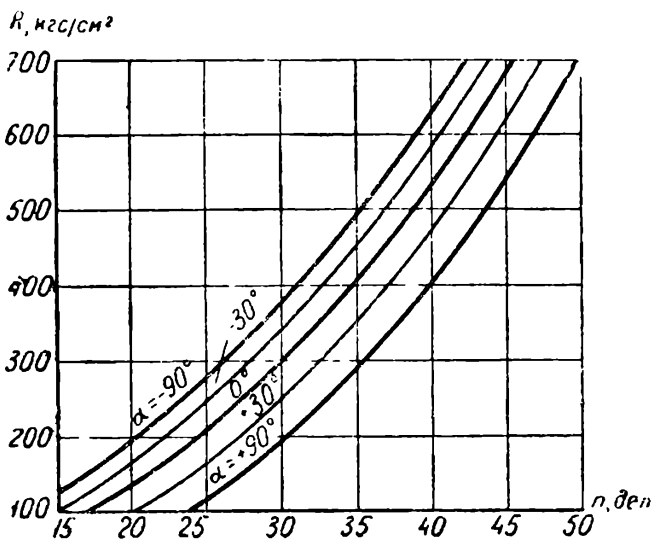


Рис. 4.14. Семейство кривых для склерометра типа M

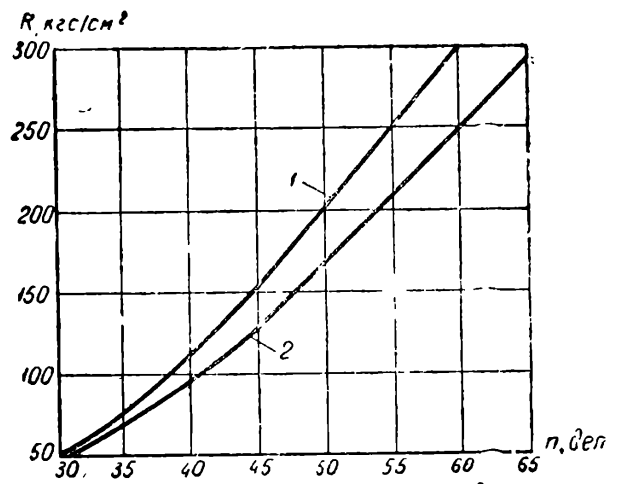


Рис. 4.15. Семейство тарировочных кривых для склерометра типа P  
1 — испытание на перегородках; 2 — испытание на перекрытиях

Единая тарировочная кривая «показания отскока — прочность при сжатии», полученная на основании измерений склерометром типа М, приведена на рис. 4.14 совместно с кривой, которая включает угловые поправки. Преобразование измерений, проведенных прибором типа М, в измерения прибора типа N производится с помощью следующего выражения:

$$S_N = 1,15S_M, \quad (4.17)$$

где  $S_N$  — показание эквивалентного отскока от склерометра типа N;  $S_M$  — измеренный показатель отскока от склерометра типа М; обе величины выражены делениями шкалы.

Последний вид склерометра из серии Шмидта является маятниковым. С помощью этого склерометра можно производить два вида измерений: по вертикальной поверхности и по горизонтальной. Соответствующие две тарировочные кривые, представляющие собой зависимость «угловое показание отскока — прочность бетона при сжатии» для двух видов испытания представлены на рис. 4.15. Если и в этом случае требуется применение метода коэффициентов влияния, то преобразование измерений, выполненных маятниковым склерометром, в показания отскока, соответствующие склерометру типа N, производятся:

для вертикальной плоскости

$$S_N = 0,6 S_{Pv} - 3, \quad (4.18)$$

где  $S_N$  — эквивалентное показание отскока склерометра типа N, выраженное в единицах для линейного отскока;  $S_{Pv}$  — показание углового отскока, измеренное склерометром типа P на вертикальной поверхности, выраженное в единицах для углового отскока;

для горизонтальной поверхности

$$S_N = 0,5 S_{Ph}, \quad (4.19)$$

где  $S_{Ph}$  — угловое показание отскока, измеренное склерометром типа P на горизонтальной поверхности и выраженное в единицах для углового отскока.

Запрещенная область измерений аналогична той, которая определена для склерометра с линейным отскоком, за исключением бетонов низких марок (ниже 200), для которых применение маятникового склерометра допустимо. Для этого склерометра можно снизить в испытаниях марку бетона с прочностью при сжатии между 80—100 кгс/см<sup>2</sup>. Исключается возможность испытания бетонов высоких марок (выше 300).

#### 4.1.5. Контроль однородности качества бетона

Однородность качества бетона является важным фактором в свете современной теории расчета конструкций из бетона и железобетона.

Применение метода поверхностной твердости предоставляет следующие преимущества в этой области:

- обеспечивает большим количеством данных;
- эти данные относятся к бетону, взятому из самой конструкции;
- результаты, даже если говорить о средних значениях по одному участку, дают большой разброс, который очень легко сопоставить с разбросом



результатов, полученных при разрушающих испытаниях образцов (классический метод оценки качества бетона), по сравнению с результатами по другим неразрушающим методам.

Существует два принципиальных пути для определения однородности бетона: прямой путь, применяющийся при непосредственном измерении отскока путем статистической обработки результатов, с использованием в заключение эмпирического отношения между коэффициентами вариации показаний отскока и значений прочности бетона при сжатии, и косвенный путь, в котором используется механическая прочность бетона, определенная в каждой зоне с последующей статистической обработкой данных прочности.

Возвращаясь к прямому пути, можно наметить следующие этапы расчета: определяются средние показания отскока для каждой зоны  $n_i$  в соответствии с указаниями п. 4.1.3;

вычисляется средняя величина  $\bar{n}$  на один элемент или на серию элементов или на структуру бетона в соответствии с уравнением

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{k}, \quad (4.20)$$

где  $k$  — количество испытываемых зон;

вычисляется относительное отклонение от средней величины  $\varepsilon_i$ , отклонение средней квадратичной  $S_n$  и коэффициент вариации  $C_{vn}$  средних показаний в каждой зоне испытания, так же как и в п. 2.5.15;

вычисляется коэффициент вариации прочности бетона  $C_{vR}$  на основании уравнения

$$C_{vR} = 2,2C_{vn}. \quad (4.21)$$

Далее вычисляется минимально вероятная прочность бетона  $R_{\text{мин}}$ :

$$R_{\text{мин}} = \bar{R} (1 - t C_{vR}), \quad (4.22)$$

где  $\bar{R}$  — средняя прочность бетона, соответствующая среднему значению  $\bar{n}$  на тарировочной кривой «показание отскока — прочность испытываемого бетона на сжатие», а  $t$  — коэффициент, который зависит от количества проверяемых зон и вида конструкции (см. п. 2.5.14).

Прочностная характеристика, которая сравнивается с проектной маркой бетона  $M$ , в том случае, если бетон испытывается в возрасте приблизительно 28 суток, определяется из уравнения

$$K = \frac{R_{\text{мин}}}{M}, \quad (4.23)$$

в котором  $K$  — коэффициент однородности, который отражает качество бетона, уложенного в конструкцию, а также служит параметром нормального распределения Гаусса. Если кривая распределения имеет резко выраженную положительную асимметрию (см. п. 2.5.14), вводят поправочный коэффициент  $\beta$  больше единицы согласно уравнению

$$K' = \beta \frac{R_{\text{мин}}}{M}, \quad (4.24)$$

в котором величина  $\beta$  приведена в п. 2.5.14. В другом варианте этого метода непосредственно применяют значения отдельных измерений отскоков  $n$ . В этом случае значение переходного коэффициента в формуле (4.21) уменьшается до 2.

Ранее упоминалось, что имеется и второй путь преобразования показаний отскока в прочность и вычисления коэффициента вариации. Расчет по второму варианту следующий: вычисляется средняя прочность  $\bar{R}$  на элемент, на структуру бетона и т. д. по данным значений прочности в определенной зоне  $R_i$  согласно уравнению

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k}, \quad (4.25)$$

в котором  $k$  представляет собой количество проверяемых зон;

вычисляется относительное отклонение  $\varepsilon_i$  значений прочности в зоне по отношению к среднему общему значению  $\bar{R}$  по формуле

$$\varepsilon_i = R_i - \bar{R}; \quad (4.26)$$

вычисляется среднее квадратичное отклонение прочности  $S_R$  согласно уравнению

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (R_i - \bar{R})^2}{k-1}}; \quad (4.27)$$

вычисляется коэффициент вариации  $C_{vR}$  согласно выражению

$$C_{vR} = \frac{S_R}{\bar{R}} 100\%. \quad (4.28)$$

Из рассмотрения (4.28) следует, что данное отношение идентично уравнению (4.22), полученному для прямого метода.

## 4.2. МЕТОДЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ОТПЕЧАТКЕ

### 4.2.1. Принцип метода

К группе механических методов определения прочности бетона, основанных на измерениях поверхностной твердости, относятся методы отпечатков, т. е. методы, которые определяют след, оставленный на поверхности бетона от воздействия подвижной массы с известной энергией, приходящейся на эту поверхность.

Различают три разновидности метода, основанного на отпечатке:

а) метод с использованием одного отпечатка, который появляется на поверхности бетона и характеризуется геометрическими размерами;

б) метод с двумя отпечатками, из которых один получен в результате активного действия на бетон шарика большого диаметра, а другой отпечаток

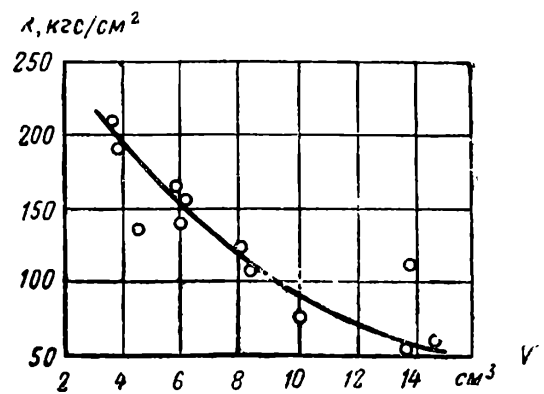
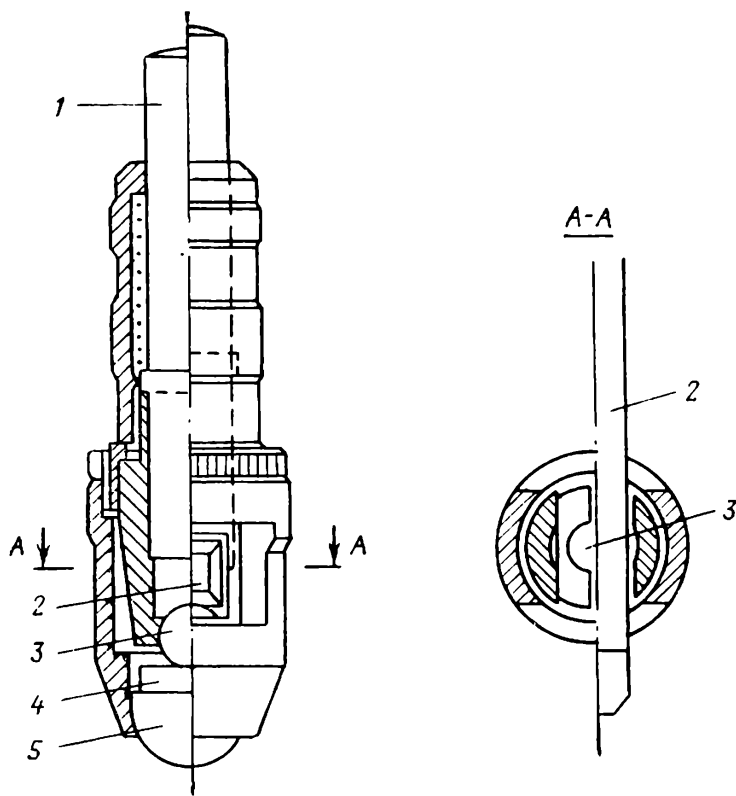


Рис. 4.17. Зависимость «объем воронки от пули — прочность бетона при сжатии» (Скрамтаев)

←  
Рис. 4.16. Склерометр Польди — Вайцмана

получен как пассивный (эталонный) от шарика меньшего диаметра. Оба шарика берутся заданной твердости и закреплены на стальном стержне.

Наиболее известный тип прибора с двойным отпечатком — металлический склерометр Польди — Вайцмана, пригодный для бетона (рис. 4.16). Определение твердости бетона  $H_B$  кгс/мм<sup>2</sup> склерометром данного типа производится согласно уравнению [17]:

$$H_B = 200 \frac{d_0^2}{D_0^2} \gamma, \quad (4.29)$$

где  $D_0$  — диаметр отпечатка на бетоне от шарика 10 мм;  $d_0$  — диаметр отпечатка на эталонном стальном стержне твердостью  $H_2 = 197$  кгс/мм<sup>2</sup> от шарика 5 мм;  $\gamma$  — коэффициент, равный 1, если прочность стального стержня составляет 70 кгс/мм<sup>2</sup>.

Для определения прочности бетона  $R$  кгс/см<sup>2</sup> можно применить эмпирическое уравнение

$$R = 0,16H_B^2 + 6H_B, \quad (4.30)$$

в котором твердость  $H_B$  выражена в кгс/мм<sup>2</sup>. Преимущество метода заключается в том, что он не связан с изменением характеристик пружины, которой определяется сила удара<sup>1</sup>;

в) метод отпечатка с помощью выстрела является одной из форм воздействия на бетон [18]. Вследствие удара пули о бетон на последнем остается относительно неправильный след в виде воронки. Объем этой воронки измеряется путем наполнения ее пластилином, затем погружают пластилин в градуированный цилиндр, наполненный водой. Между объемом ворон-

<sup>1</sup> В Советском Союзе стандартным прибором, использующим два отпечатка — на бетоне и эталоне, является молоток К. П. Кашкарова (ГОСТ 10180—67, стр. 21, п. 4.4.1, рис. 3) (примеч. науч. ред.).

ки и прочностью бетона на сжатие существует зависимость в виде, изображенной на рис. 4.17. Очевидно, что данный метод применяется для бетонов низких марок — ниже 200. Выше указанного предела можно применить метод, называемый взрывным, т. е. основанный на быстротекущей физико-химической реакции, который достаточно далеко отходит от неразрушающих методов [19]. Этот метод заключается в проведении взрыва на поверхности бетона и получении, благодаря детонации, воронки определенной глубины. Коэффициент разрушения, вычисляют из формулы

$$K_{\text{разр}} = \frac{h-a}{\sqrt[3]{C}}, \quad (4.31)$$

где  $h$  — глубина воронки в м;  $a$  — расстояние от центра взрыва до поверхности бетона в м;  $C$  — величина взрывной нагрузки в кг.

В табл. 4.6 приводится преобразование значений коэффициента разрушения для определения прочности при сжатии и растяжении при изгибе бетона.

Таблица 4.6. Таблица преобразования  $K_{\text{разр}}-R-R_{ti}$

$K_{\text{разр}}$	$R$ , кгс/см <sup>2</sup> (прочность при сжатии)	$R_{ti}$ , кгс/см <sup>2</sup> (прочность на растяжение при изгибе)	$K_{\text{разр}}$	$R$ , кгс/см <sup>2</sup> (прочность при сжатии)	$R_{ti}$ , кгс/см <sup>2</sup> (прочность на растяжение при изгибе)
0,16	250	35	0,12	400	51
0,15	270	38	0,11	450	56
0,14	300	41	0,1	500	62
0,13	350	46			

Из сказанного вытекает, что методы, упомянутые в пп. «б» и «в», исключаются из дальнейшего рассмотрения, так как применяются редко<sup>1</sup>.

Возвращаясь к методу отпечатка, следует отметить, что в качестве штампов применяются тела сферической формы. Диаметр  $D$  сферы может изменяться от 10—20 мм в зависимости от марки бетона. На рис. 4.18 приведено отношение между твердостью и нагрузкой, применяемой для шариков диаметром 5 и 10 мм. Оптимальной областью применения является зона вблизи максимума кривой, а поскольку бетон менее твердый, чем сталь, предпочтительны шарики диаметром 10 мм по сравнению с шариками диаметром 5 мм. Для бетонов пониженных марок в небольшом возрасте может появиться необходимость применения шариков диаметром 20 мм. Оптимальным случаем считается, если диаметр шарика удовлетворяет неравенству

$$0,3D < d < 0,7D, \quad (4.32)$$

где  $d$  — диаметр отпечатка;  $D$  — диаметр шарика.

<sup>1</sup> С мнением авторов согласиться нельзя. См. сноску на стр. 186 (примеч. науч. ред.).

Иногда предлагают измерять не диаметр отпечатка  $d$ , а глубину отпечатка  $h$ . Фактически эти два размера связаны между собой, как это видно из рис. 4.19 и уравнения

$$\frac{d^2}{4} = h(D-h), \quad (4.33)$$

и, поскольку всегда  $h \ll D$ , можем написать:

$$h = \frac{d^2}{4D}. \quad (4.34)$$

Формула (4.33) показывает, что  $h$  изменяется в процентном отношении больше, чем  $d$ ; если  $d$  изменяется от  $0,3 D$  до  $0,6 D$  и это принять за 100%, то  $h$  изменяется в соответствии с формулой (4.33) от  $0,022 D$  до  $0,090 D$ , следовательно, с превышением 400%.

Если учесть, что минимальный размер отпечатка, который можно ожидать в процессе измерения, составляет самое большее  $0,2 \text{ мм}$ , то при измерении глубины имеем изменение размеров в 4 раза при диаметре менее  $15 \text{ мм}$ .

Энергия, которая передается бетону в виде удара, может быть получена в результате свободного падения бойка или с помощью принудительной силы. В принципе безразлично, как может быть создана эта энергия; существенным является тот факт, что, например, стальной шарик падает на поверхность бетона с энергией, равной

$$E_1 = \frac{mv_1^2}{2},$$

где  $m$  — подвижная масса системы;  $v_1$  — скорость движения подвижной массы в момент удара.

Во время удара, который продолжается в течение некоторого времени  $\Delta t$ , одна часть падающей энергии поглощается бетоном в виде энергии деформации, а также в виде теплоты. Энергия деформации частично возвращается в виде отскока подвижной массы, а другая часть энергии поглощается в бетоне.

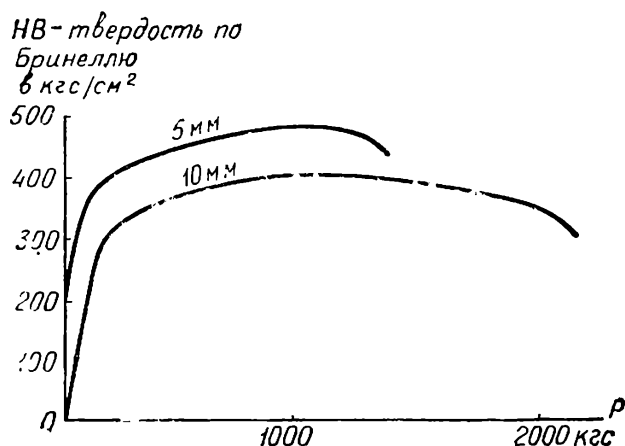


Рис. 4.18. Зависимость между твердостью и нагрузкой

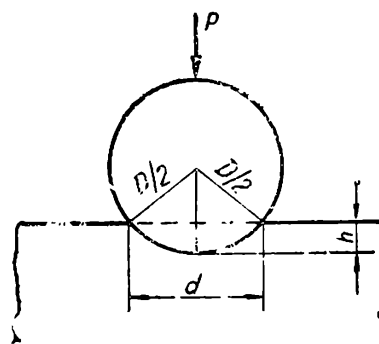


Рис. 4.19. Схема проникновения шарика в бетон

## 4.2.2. Применяемая аппаратура

При испытаниях методом отпечатка используются приборы следующих типов:

1) маятниковый, в котором энергия удара обеспечивается свободным падением балансира, жестко связанного со стержнем, вращающимся в центральной части прибора [20]. Падение балансира может происходить на вертикальную поверхность (угол  $90^\circ$  или  $180^\circ$ , направление удара горизонтальное) и на горизонтальную (угол составляет только  $90^\circ$ , направление удара вертикальное, как это видно на рис. 4.20);

2) линейный с пружиной, в котором направление удара прямолинейно и энергия удара обеспечивается пружиной или системой пружин. Линейный тип в первую очередь может быть использован в двух вариантах (см. п. 4.2.1):

а) с одним отпечатком на поверхности бетона;

б) с двойным отпечатком: на поверхности бетона и на стандартном стержне.

Склерометр пружинный с одним отпечатком — наиболее распространенный тип [21]. Известными конструкциями являются немецкие: Франка (ФРГ) или ХПС (ГДР). Они аналогичной конструкции, продольный разрез которой представлен на рис. 4.21.

Порядок работы склерометра следующий. Склерометр располагается перпендикулярно к поверхности бетона, затем задней рукояткой постепенно нажимают на гильзу 2 и на крышку 3. Стержень 4, находящийся внутри склерометра, сжимает пружины 7 и 9 и приводит в движение подвижную массу 8 и крючок 10. Когда хвостовик крючка достигнет конического отверстия 12, крючок поднимется, подвижная масса освободится и под действием пружины 9 продвинется вперед к крышке 1, расположенной впереди и жестко связанной со стержнем 4. Удар передается шариком 6, закрепленному во втулке 5, шарик деформирует бетон и оставит отпечаток.

Калибрование прибора производится на металлической плите толщиной около 10 мм и твердостью 210—220 кгс/мм<sup>2</sup>, принятой по Бринеллю.

Плита закрепляется в вертикальной и горизонтальной плоскостях так, чтобы вместе с закреплением иметь массу 300 кг. Затем прибором производят два-три удара и вычисляют среднее значение. Таким образом, устанавли-

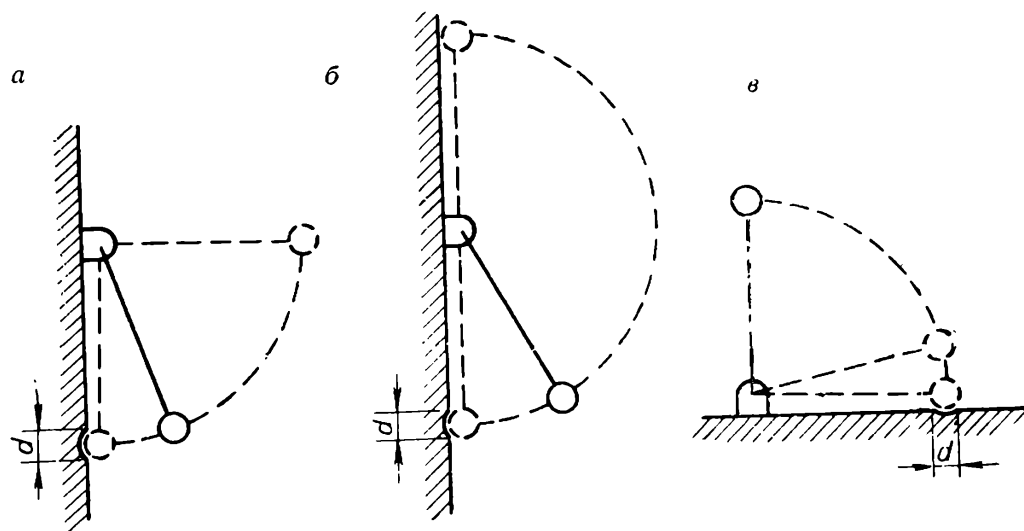


Рис. 4.20. Маятниковый склерометр и отпечатки

а — вертикальная поверхность, удар под  $\angle 90^\circ$ ; б — вертикальная поверхность, удар под  $\angle 180^\circ$ ; в — горизонтальная поверхность, удар под  $\angle 90^\circ$

ливают твердость по Бринеллю, соответствующую этим двум средним значениям, и если полученные значения не превышают на  $\pm 10\%$  значений, предусмотренных для плиты (обычно 210—220), проверка считается соответствующей требованиям. Если отклонение больше, то проверяется в первую очередь шарик, который не должен сплющиваться или быть с царапинами. Повреждение шарика исправляют или его заменяют.

Основные характеристики склерометров для метода отпечатков с пружиной или с маятником приведены в табл. 4.7\*.

Таблица 4.7. Характеристики склерометров для метода отпечатков

Характеристика	Склерометр с пружиной		Склерометр с маятником	
	полный удар	неполный удар $\left(\frac{1}{2}\right)$	полный удар	неполный удар $\left(\frac{1}{2}\right)$
Работа механического удара в кгсм . . . . .	50	25	137	68,5
Удар за счет . . . . .	Спуска пружины		Падения под углом	
Высота падения в делениях . . . . .	—	—	70	35
Диаметр шарика в мм . . . . .	10	10	25	25
Принятый диаметр отпечатка в мм . . . . .	3—7	3—7	7—14	7—14
Свободный ход ударника . . . . .	5 см	2,5 см	180°	90°
Соответствующее предельное $R$ , кгс/см <sup>2</sup> . . . . .	100—600	50—200	100—600	50—200

Диаметр отпечатка измеряют обычной лупой с делениями с точностью до 0,1 мм.

Склерометры — приборы с двойным отпечатком на поверхности бетона и на калибровочном материале обладают преимуществом благодаря тому, что производимый удар может иметь произвольное значение [22, 23]. Примером классического склерометра такого типа является прибор Польди — Вайцмана, применяемый в испытаниях бетона (см. рис. 4.16).

\* В дополнение к таблице можно рекомендовать читателю материал «Указаний по испытанию прочности бетона в конструкциях и сооружениях неразрушающими методами с применением приборов механического действия» (РУ 171-67). Госстрой УССР, Киев, «Будівельник», 1968 (примеч. науч. ред.).

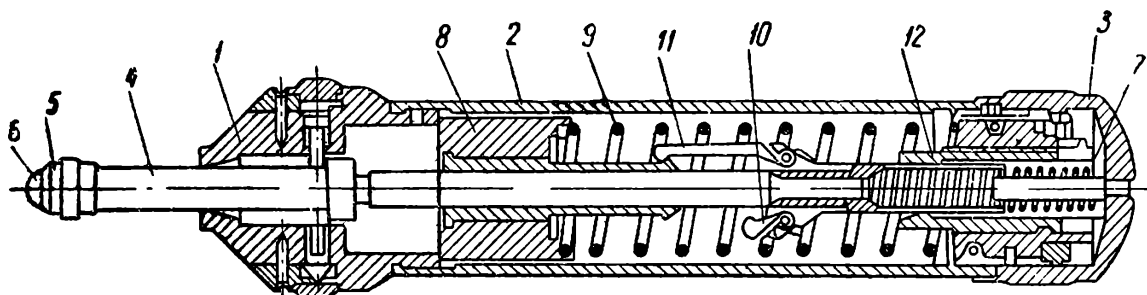


Рис. 4.21. Продольный разрез склерометра НПС

### 4.2.3. Подготовка и проведение испытания

Поверхность для испытания на конструктивном элементе выбирают так же, как и в методах, основанных на отскоке, предпочтительно со стороны, прилегающей к опалубке [29, 30]. Необходимо, чтобы поверхность бетона была ровной и сухой. Элемент, на котором выделяют отдельные участки для испытаний, должен быть жестким на изгиб по направлению движения ударяющей массы при действии силы не менее 300 кг во избежание снижения энергии на перемешающейся части элемента.

Участок конструкции, для которой определяется прочность бетона, должен быть размером около  $20 \times 20$  см; его нужно очистить с помощью шлифовального камня или наждака от цементного молока, посторонних тел, главным образом оставшихся после распалубки, а также от пыли.

В границах зоны выбирают отдельные точки для испытания, стараясь не намечать их вблизи крупного заполнителя или там, где много пор и пустот.

Точки испытания выбирают в количестве 10—12 расположенными от грани элемента минимум на 4—5 см и на расстоянии 2 см друг от друга.

Для получения четкого отпечатка рекомендуется поверхность бетона побелить или покрыть краской индиго и осветить боковым светом.

Склерометр устанавливается по оси, перпендикулярной к поверхности бетона. Интенсивность удара выбирают соответственно качеству бетона. Если прочность бетона ниже  $110 \text{ кгс/см}^2$ , испытания производят по шкале с половинным количеством делений.

Для осуществления удара необходимо взвести ударник склерометра, приложив равномерное давление, которое увеличивается постепенно. Это давление воздействует на крышку и гильзу прибора без конструктивных поломок. Выполнение удара — результат освобождения склерометра от давления. Ударный стержень 4 остается в начальном положении, когда обеспечивается подготовка для нового удара (см. рис. 4.21). После окончания ударов (в количестве 10—12) измеряют диаметр отпечатка. Проведение измерений предполагает определенную тренировку оператора и состоит из следующих этапов [25]:

грубое крепление лупы или объектива, из-за чего калиброванная шкала пересекает отпечаток;

боковое перемещение калибровочной шкалы для последующей настройки лупы по началу шкалы, которая должна быть касательной к воронке отпечатка;

легкое движение шкалы до противоположного края отпечатка, позволяющее установить максимальное измерение в одном направлении; это позволит также установить, что размер отпечатка является диаметром, а не хордой.

Измерение диаметра отпечатка производится по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Если два диаметра отличаются между собой больше чем на 15%, то результат исключается. Если разница меньше 15%, то вычисляется средний диаметр отпечатка  $d$ :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (4.35)$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — диаметры отпечатков по двум перпендикулярным направлениям.



Если участок испытаний содержит  $n$  отпечатков, пригодных для обработки, то вычисляется предварительный средний диаметр отпечатка  $d'_m$ :

$$d'_m = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} . \quad (4.36)$$

Отдельные результаты  $d_i$  сравнивают с предварительным средним диаметром  $d'_m$  и исключают все значения, которые не удовлетворяют неравенству:

$$\frac{d_i}{d'_m} > 0,67 . \quad (4.37)$$

Из оставшихся  $K$  отпечатков вычисляется средний окончательный диаметр  $d_m$  для участка испытаний из уравнения

$$d_m = \frac{\sum_{i=1}^K d_i}{K} . \quad (4.38)$$

Для облегчения измерений рекомендуется, чтобы ближайший отпечаток был известен во избежание повторного пересчитывания.

Во всех этих измерениях предполагается, что применяемые размеры шарика были подобраны так, чтобы диаметры отпечатков находились в пределах интервала по (4.32).

#### 4.2.4. Определение прочности бетона

Преобразование средних значений диаметров отпечатков в прочность бетона при сжатии для соответствующего участка испытания производится в соответствии с табл. 4.8 или по рис. 4.22 и 4.23 в том случае, когда бетон хранят в нормальных условиях (влажность бетона 2—3%) и испытывают по истечении 28 суток после приготовления; расположение склерометра при этом горизонтальное.

Таблица 4.8. Преобразование диаметра отпечатка ( $d$ ) в стандартную прочность ( $R_{\text{станд}}$ )

Диаметр отпечатка в мм	Шкала 1/1		Шкала 1/2		Диаметр отпечатка в мм	Шкала 1/1		Шкала 1/2	
	$R_{\text{ср}}$	$R_{\text{мин}}$	$R_{\text{ср}}$	$R_{\text{мин}}$		$R_{\text{ср}}$	$R_{\text{мин}}$	$R_{\text{ср}}$	$R_{\text{мин}}$
кгс/см <sup>2</sup>					кгс/см <sup>2</sup>				
4	840	700	215	200	5,6	210	145	—	—
4,2	690	560	165	150	5,8	180	120	—	—
4,4	560	450	130	115	6	155	95	—	—
4,6	470	370	105	90	6,2	135	80	—	—
4,8	390	310	85	70	6,4	120	65	—	—
5	330	250	65	55	6,6	105	50	—	—
5,2	280	210	55	40	6,8	90	—	—	—
5,4	240	175	46	—	7	80	—	—	—

В таблице приведены дополнительные данные по пределам средней и минимальной прочности, полученной при испытаниях.

Если условия, которые определяют стандартные требования испытаний, не выполняются, тогда фактическую прочность бетона рассчитывают путем умножения стандартной прочности  $R_{\text{станд}}$ , полученной из таблицы, на общий коэффициент влияния  $C_t$ :

$$R = R_{\text{станд}} C_t. \quad (4.39)$$

Определение общего коэффициента влияния  $C_t$  производится из принципа совмещения результатов в виде

$$C_t = C_p C_m C_u, \quad (4.40)$$

где  $C_p$  — коэффициент влияния за счет расположения склерометра;  $C_m$  — коэффициент влияния зрелости бетона;  $C_u$  — коэффициент влияния влажности бетона.

Применение уравнения в виде (4.40) предполагает независимое действие всех трех коэффициентов влияния, значения которых приведены в табл. 4.9—4.11. Следует напомнить, что коэффициент созревания бетона был получен из уравнения (4.3).

Коэффициент влияния  $C_p$  за счет расположения склерометра показывает, что тогда, когда испытание производят на горизонтальной поверхности в направлении сверху вниз, диаметр отпечатка увеличивается вследствие участия ускорения силы тяжести, а когда производят снизу вверх, диаметр отпечатка меньше вследствие противодействия веса.

Коэффициент зрелости бетона обуславливается тем фактом, что по мере того, как бетон стареет, поверхностный слой как бы претерпевает дополнительную обработку, вступая в контакт с углекислотой из воздуха [26]. Со временем созревания бетона влияние коэффициента зрелости  $C_m$  сни-

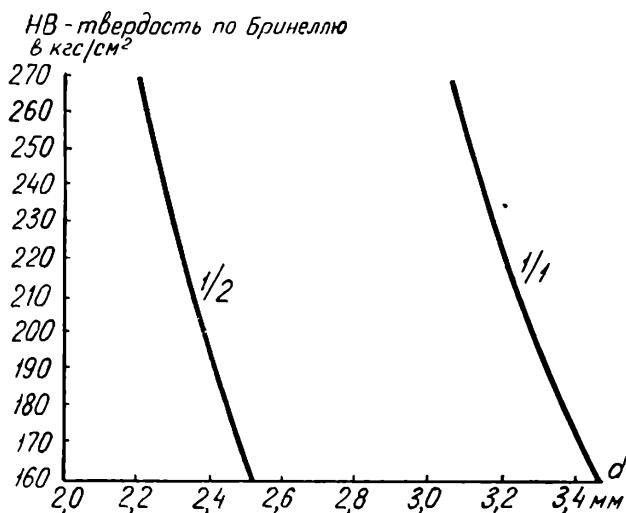


Рис. 4.22. Зависимость «твердость по Бринеллю — диаметр отпечатка по склерометру Франка и HPS»

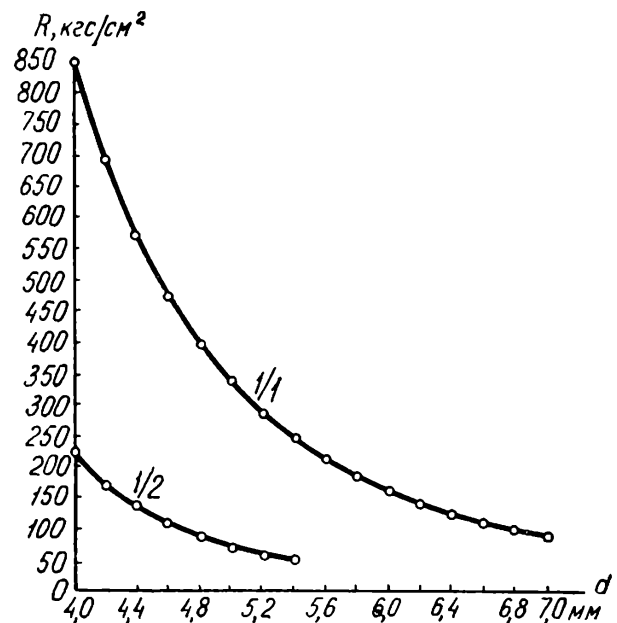


Рис. 4.23. Тарировочная кривая «отпечаток — прочность при сжатии» для образцов стандартной влажности и возраста

Таблица 4.9. Значение коэффициента  $C_p$

Направление испытания	$C_p$
Сверху вниз . . . . .	1,05
Горизонтальное . . . . .	1
Снизу вверх . . . . .	0,95

Таблица 4.11. Значения коэффициента  $C_u$

Влажность бетона в %	$C_u$
1	0,96
6	1
8	1,1
12	1,2
Насыщенный	1,4

Таблица 4.10. Значения коэффициента  $C_m$

Зрелость в °С × сутки	$C_m$
300	1,2
600	1,04
900	1
2700	0,95
6000	0,86
10 800	0,75
22 000	0,67
33 000	0,6

жается, если в качестве начальных взять значения, соответствующие возрасту 28 — 30 суток в условиях стандартного хранения при температуре 20° С.

Коэффициент влияния  $C_u$  отражает влияние влажности бетона. По мере того как бетон становится более насыщенным водой, увеличивается межпоровое давление и силы поверхностного натяжения в капиллярах, и поверхностная структура бетона легче разрушается по действию ударов.

Существует и другой косвенный путь преобразования измерений отпечатков в прочность бетона с учетом состава и степени зрелости испытываемого бетона. Этот путь использует предварительное преобразование отпечатка в эквивалентный показатель отскока по склерометру Шмидта типа N. Испытания, проведенные в Румынии [16], показали (рис. 4.24), что между двумя величинами  $n$  и  $d$  существует линейная зависимость, которая выражается формулой:

для шкалы 1/1:

$$n = 76 - 7,95d; \quad (4.41)$$

для шкалы 1/2

$$n = 62 - 7,36d. \quad (4.42)$$

По формулам (4.41) и (4.42) находят эквивалентный показатель отскока, производят обработку результатов, как это следует из процедуры, изложенной в пп. 4.1.4.2 или 4.1.4.3, в зависимости от того, имеются ли или нет образцы испытанного бетона.

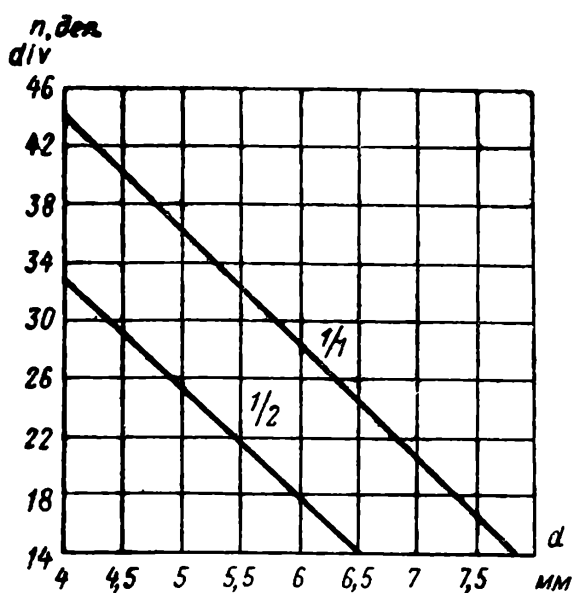


Рис. 4.24. Зависимость «диаметр отпечатка — показатель отскока» (тип N)

Для уточнения метода определения прочности бетона с помощью склерометра с отпечатком необходимо принимать во внимание соответствующие данные по склерометру с отскоком. В том случае, когда нет возможности проверить результаты определения прочности по измеренным отпечаткам, точность метода необходимо оценивать в пределах  $\pm 30—40\%$ .

Другой способ учитывать результаты испытания образцов из того же состава, что и бетон конструкций, представляется зависимостью в общем виде [27]:

$$R = C \left( \frac{d}{D} \right)^{-4}, \quad (4.43)$$

где  $d$  — диаметр отпечатка;  $D$  — диаметр шарика, производящего отпечаток;  $C$  — постоянная, которая зависит от состава, зрелости, влажности испытываемого бетона.

Если постоянная  $C$  определена с помощью эталонных испытаний, то можно рассчитывать на получение относительно хорошей точности — около  $\pm 20—30\%$ .

Определение однородности качества бетона в сооружениях с помощью метода отпечатка производится аналогично изложенному в п. 4.1.5 для метода отскока, как косвенного метода. На основании изложенного выше прочность для основного элемента получена путем измерения 10—12 отпечатков в зоне на площади около  $20 \times 20$  см; статистическая обработка может дать некоторые расхождения. Полагая полученные данные типичными усредненными величинами, вычисляют среднюю прочность, а также величину среднего квадратичного отклонения, коэффициента изменчивости и другие величины (см. п. 4.1.5), относящиеся к прочности бетона.

### 4.3. МЕТОДЫ ВЫДЕРГИВАНИЯ И ЗАБИВКИ СТЕРЖНЕЙ

Эта группа механических методов определения поверхностной твердости не лишена перспективы, если ее рассматривать на основе достижений технического прогресса. Испытания осуществляют введением в бетон металлических элементов с помощью выстрела и измерением силы при выдергивании. Ниже предлагается два типичных примера возможностей этой группы методов.

#### 4.3.1. Метод забивки стержня

Для забивки металлических штифтов, стержней, элементов, закрепляемых в бетоне, служит монтажный пистолет. Такой пистолет состоит из следующих основных деталей: взаимозаменяемых трубок определенного типа различного диаметра (например 18 и 12 мм), трубчатой муфты, корпуса пистолета, в который монтируется механизм освобождения ударника, амортизации, кожух для защиты трубок и взрывное приспособление.

В том случае, когда предполагается применить монтажный пистолет для определения прочности бетона, рекомендуется использовать в качестве снаряда стальной стержень с заостренным и закаленным концом.

Пистолет с защитным противорикошетным раструбом размещается на поверхности бетона, и выстрел производится стальным стержнем.

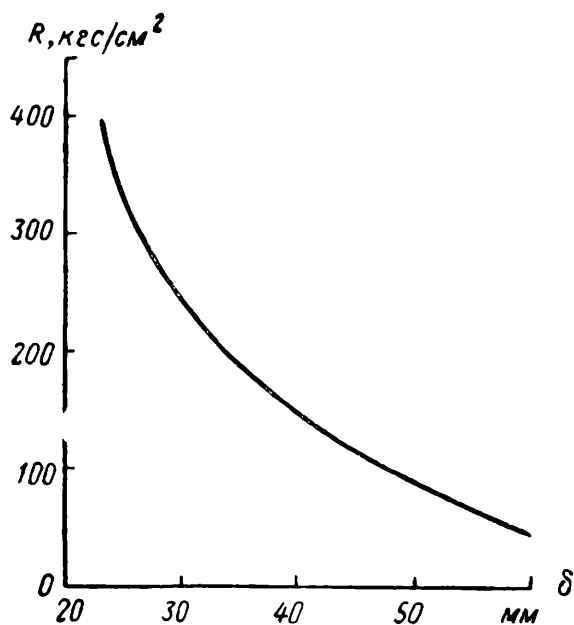


Рис. 4.25. Зависимость «глубина проникания — прочность при сжатии»

Глубина проникания стального стержня зависит от прочности бетона. Измеряется длина оставшейся свободной части стального стержня: разность между полной длиной стержня и остатком является глубиной проникания. Вычерчивают тарировочную кривую, которая позволяет перейти от глубины проникания к прочности бетона при сжатии. Такой график, построенный для применения стержня-снаряда диаметром 5,5 и длиной 60 мм с пороховым зарядом В4, который позволяет развивать давление газов  $1000 \pm 100$  кгс/см<sup>2</sup>, представлен на рис. 4.25.

Значительное изменение давления газа может вызвать нежелательное рассеивание результатов. Поэтому стремятся выдерживать постоянство заряда так, чтобы наблюдающееся изменение давления газа было  $\pm 20$  кгс/см<sup>2</sup>. Часть стержней может попасть на крупный заполнитель в бетоне, и в этом случае глубина проникания будет меньше.

Рекомендуется исключение значений, в которых свободный конец стержня длиной 60 мм больше указанных ниже величин:

16	мм,	в	бетоне	прочностью	100	кгс/см <sup>2</sup>
25	»	»	»	»	150	»
30	»	»	»	»	200	»
33	»	»	»	»	250	»
35	»	»	»	»	300	»
40	»	»	»	»	400	»

Расстояние между точками испытания и от края элемента не должно быть меньше 15—20 см.

Не рекомендуется применять метод для тонких элементов, а также в зонах, имеющих значительные местные дефекты.

### 4.3.2. Метод выдергивания стержня

Метод заключается в том [28], что с помощью монтажного пистолета вводится в тело бетона стандартный стержень Хилти ДХ 745 диаметром, равным 4 мм, и длиной цилиндрической части 34 мм (рис. 4.26). Стержень имеет нарезную головку, вводится он в бетон выстрелом строго перпендикулярно к поверхности с помощью направляющего механизма, предусмотренного для регулирования детонации заряда. По истечении 10 мин после введения стержня его извлекают с помощью прибора с манометром, который фиксирует необходимую силу выдергивания  $N$ .

Простой теоретический анализ (рис. 4.27) показал, что эта сила выражается формулой

$$N = \pi dl\tau = \pi dl f P_{\alpha}, \quad (4.44)$$

Рис. 4.27. Расчетная схема сил выдергивания

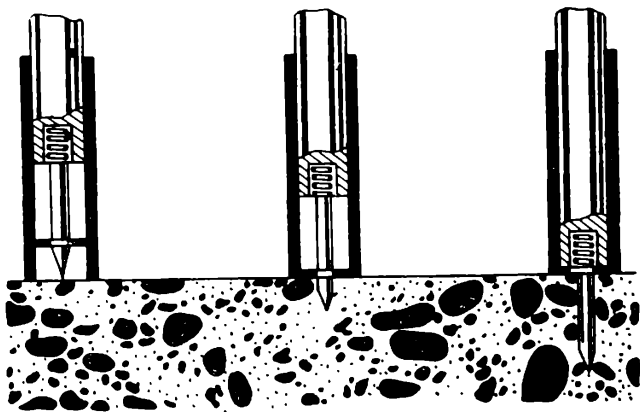


Рис. 4.26. Проникание стержня в бетон (последовательные этапы)

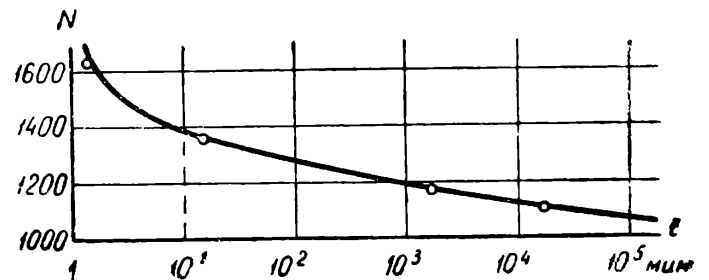
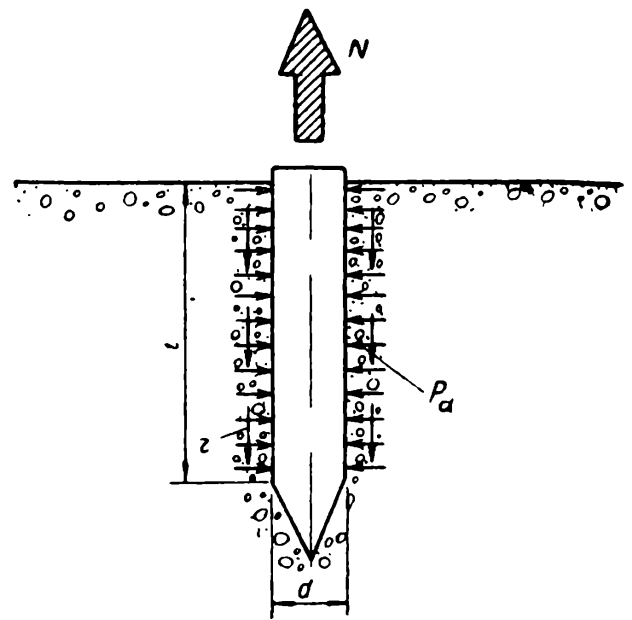


Рис. 4.28. Зависимость силы выдергивания от времени

где  $\tau$  — тангенциальное напряжение на поверхности стержня от выдергивания;  $f$  — коэффициент трения стержень—бетон;  $P_\alpha$  — радиальное давление, нормальное к поверхности стержня.

Первые четыре сомножителя правой части формулы (4.44) — постоянные для стержня с заданными размерами из одного определенного материала. Нормальное давление к поверхности стержня  $P_\alpha$  зависит от характеристик бетона, а именно: от прочности, модуля упругости, коэффициента Пуассона, деформативности бетона при растяжении и пр.

По мнению авторов метода [28], все эти характеристики могут быть выражены в функции прочности бетона при сжатии в виде формулы

$$P_\alpha = CR^a, \quad (4.45)$$

где  $C$  и  $a$  — постоянные, зависящие от состава, возраста, влажности бетона и т. д.

Подставляя уравнение (4.45) в (4.44) и заменяя все постоянные коэффициенты на  $K$ , получим

$$N = KR^a, \quad (4.46)$$

выражение, которое поясняет возможность установления связи между силой выдергивания стержня и прочностью бетона на сжатие<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Описанный метод является разновидностью известного в Советском Союзе с 30-х годов метода Вольфа — Скрамтаева. В последнее время этот метод стал применяться чаще в связи с разработкой усовершенствованной модели переносного устройства для выдергивания стержней — прибора ГПНВ-5 — и развития теоретической основы метода. Важным обстоятельством является также то, что метод Вольфа — Скрамтаева может наиболее полноценно дополнять другие неразрушающие методы при их комплексировании (примеч. науч. ред.).

Экспериментальным путем установлено, что скорость выдергивания стержня практически не влияет на результаты.

После введения стержня релаксация напряжений в бетоне приводит к продолжающемуся снижению силы выдергивания во времени (рис. 4.28). Принимая во внимание условие минимальности влияния этого явления, установлен перерыв в течение 10 мин между введением и выдергиванием стержня.

Относительно влияния влажности бетона приходят к выводу, что она незначительна до тех пор, пока бетон не погружен в воду.

Минимальное расстояние между точками для испытания, а также между ними и гранью элемента должно быть 15 см. Наименьшее количество применяемых стержней для получения надежных результатов во избежание встречи стержня при забивке в бетон с крупным заполнителем зависит от марки бетона и равно 4 для марок бетона до 225; 5 для марки 300 и 8 для марки 450.

Существование предварительного напряжения в бетоне, по-видимому, не влияет на результаты измерений, по крайней мере до напряжений, равных 75% от разрушающих, и для марок до 250.

Отношение между силой выдергивания и прочностью бетона зависит при прочих равных условиях от свойств заполнителя, отношения  $V/C$ , возраста бетона и зернового состава заполнителя.

Для бетонов с известняковым дробленным заполнителем, приготовленных с отношением  $V/C < 0,7$ , можно исключить из обсуждения первые два

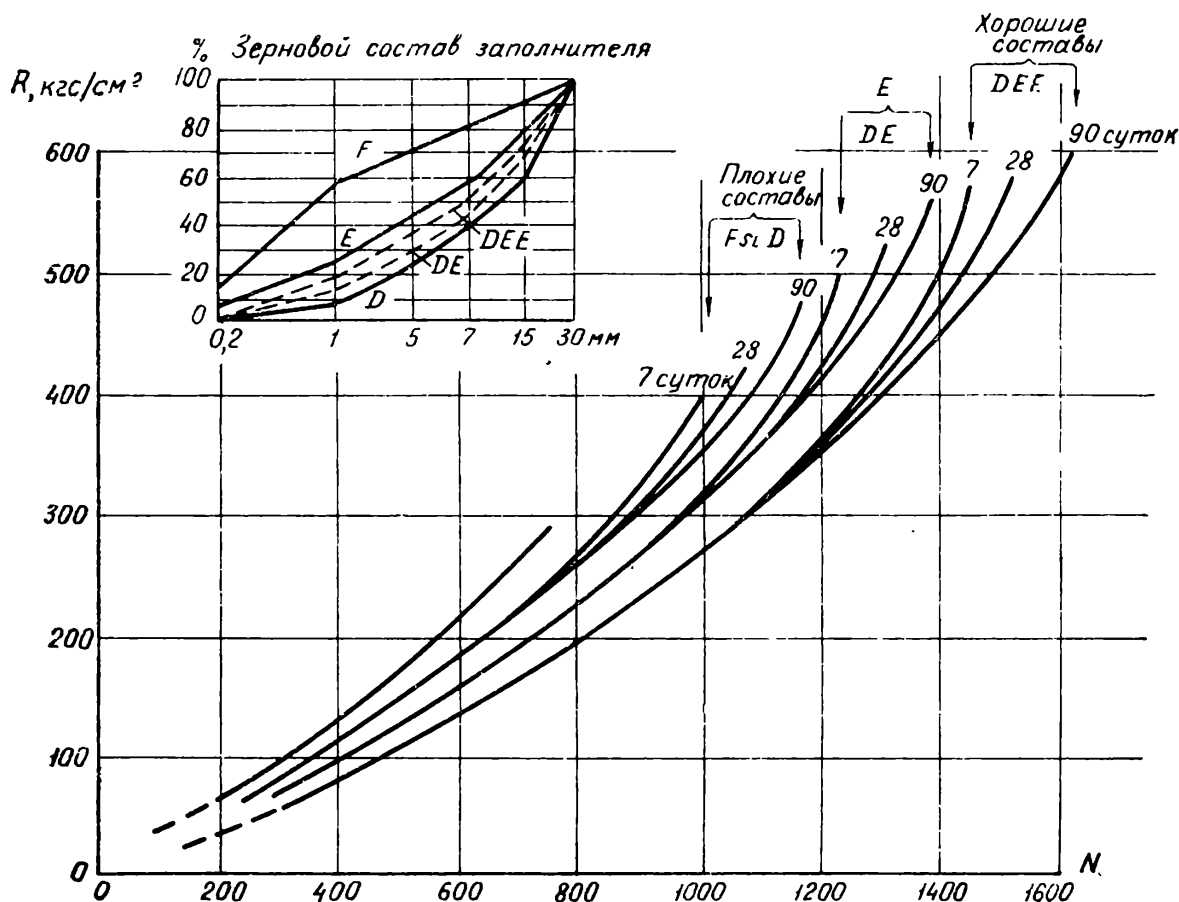


Рис. 4.29. Зависимость «сила выдергивания — прочность бетона на сжатие с известняковым заполнителем»

фактора, тогда из рис. 4.29 можно оценить влияние возраста и зернового состава заполнителя. Из рис. 4.29 видно, что по мере того как возраст бетона увеличивается, прочность, соответствующая той же силе выдергивания, снижается. Более важным, чем влияние возраста, по-видимому, является влияние зернового состава заполнителя. Плотные составы бетонов расположены в зоне кривой *DEE* (см. рис. 4.29). Хорошая «упаковка» заполнителя способствует созданию повышенной силы выдергивания стержня, которая увеличивается больше, чем прочность бетона при сжатии за счет «упаковки». Поэтому определенному значению силы выдергивания соответствует тем бóльшая прочность, чем более «неплотная» кривая зернового состава использована (см. кривую *F* — мелкий заполнитель или кривую *D* — крупный заполнитель). Кривая зернового состава *E* занимает промежуточное положение между кривой плохого зернового состава (*F* или *D*) и кривой (*DEE*) оптимального зернового состава.

Испытание бетонов при отношении  $V/C > 0,7$  не рекомендуется. Оптимальная область применения метода относится к маркам бетона средним и низким (ниже 300), но которые не приготавливаются при чрезмерно больших  $V/C$ .



## 5. РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

### 5.1. ВВЕДЕНИЕ

Достижения атомной физики последних десятилетий используются и в области неразрушающих методов испытаний. Наиболее важные практические результаты получены с помощью «закрытых» источников излучения. Под «закрытым» источником подразумевают радиоизотоп, закрытый непроницаемой оболочкой (экраном) и не связанный с проверяемым материалом. Существуют также «открытые» источники, в которых наблюдается эта связь.

Закрытые источники имеют преимущества: при измерениях они не требуют сложной защиты и в проверяемом материале не возникает остаточная радиоактивность.

При испытаниях бетона с помощью проникающих излучений применяют два вида излучения:

а) метод проникающей радиации, в котором используют поток фотонов, способный проникать сквозь толщу материала, в том числе и через бетон, и относящийся к излучениям типа рентгеновского или гамма-излучения;

в) метод с быстрыми нейтронами, в которых используют поток быстрых нейтронов; этот метод находит применение в более ограниченной области — для определения влажности бетона или его компонентов.

### 5.2. МЕТОДЫ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

Излучение, проникающее сквозь бетон, воздух, воду, арматуру и пр., является проникающей радиацией, взаимодействующей с атомами материала, которые находятся на пути, и частично поглощается ими или же рассеиваются. Взаимодействие между излучением и атомами материала тем сильнее, чем плотнее просвечиваемый материал.

На этом простом принципе, аналогичном распространению света в непрозрачных телах, основываются: метод радиационной дефектоскопии, определение степени коррозии и степени уплотнения бетона, определение толщин, диаметра, профиля, положения арматуры в бетоне, контроль качества инъекции и т. д.

#### 5.2.1. Принципы метода проникающей радиации

**5.2.1.1. Создание проникающей радиации.** Рентгеновское излучение и гамма-излучение, как свет и радиоволны, имеют общую природу — это электромагнитные излучения. Они отличаются между собой только частотой колебаний и рассматриваются как волны или частицы. В табл. 5.1 представлены различные виды электромагнитного излучения в порядке последовательности частот [2].

Таблица 5.1. Шкала электромагнитных волн

Наименование	$\nu$ , гц	$\lambda$ , см	Преобладающий состав.
Электрические возмущения . . . . .	$10^2$	$3 \cdot 10^8$	Поле
Радиоволны . . . . .	$5 \cdot 10^5 - 10^6$	$6 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$	Волны
Ультракороткие волны . . . . .	$10^8$	$3 \cdot 10^2$	»
Радиолокатор . . . . .	$10^{10}$	3	»
Свет . . . . .	$5 \cdot 10^{14} - 10^{15}$	$6 \cdot 10^{-5} -$ $3 \cdot 10^{-5}$	»
Рентгеновское излучение . . . . .	$10^{18} - 10^{20}$	$3 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-10}$	Частицы
$\gamma$ -излучение ядерное . . . . .	$10^{21}$	$3 \cdot 10^{-11}$	»
$\gamma$ -излучение от ускорителя . . . . .	$10^{24}$	$3 \cdot 10^{-14}$	»
$\gamma$ -излучение космическое . . . . .	$10^{27}$	$3 \cdot 10^{-17}$	»

Для испытания бетона применяют рентгеновское излучение, которое получают путем торможения электронов с предварительным ускорением в электрическом поле, созданном в вакууме для того, чтобы электроны не потеряли энергию в процессе ионизации.

В пути электроны взаимодействуют с мишенью из тяжелого металла, который играет роль тормоза ускорению электронов. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона дается уравнением

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU, \quad (5.1)$$

где  $m_e$  — масса электрона;  $e$  — заряд электрона;  $v$  — скорость электрона;  $U$  — ускорение напряжения.

Преимущества применения рентгеновского излучения в промышленной радиографии заключаются в следующем:

применяют один источник значительной интенсивности для того, чтобы сократить продолжительность экспозиции;

одновременно может быть использован промежуточный источник, благодаря чему отпадает необходимость проведения защитных измерений во время перемещения;

устанавливают один источник по направлению преобладающего излучения для того, чтобы облегчить защитные измерения в других направлениях;

используется непрерывный энергетический спектр с максимумом, положение которого может регулироваться с помощью напряжения ускорения. Все это способствует получению высшей контрастности рентгенографического изображения.

Гамма-излучение образуется благодаря переходу нестабильных радиоизотопов в устойчивое состояние. Гамма-излучение сопровождается излучением альфа-частиц (ядра гелия) и излучением бета-частиц (электроны) [4].

Энергия фотонов гамма-излучения от разных радиоизотопов заключается между 0,002 и 7,6 Мэв. Для контроля качества бетона имеет смысл использовать гамма-излучение с большой энергией, с проникающей спо-

способностью, пригодной для толщин бетона от 20 до 80 см. Имеет значение и такой фактор, как период полураспада, под которым подразумевают время, после которого активность источника снижается наполовину как следствие перехода части изотопа в устойчивое состояние. Если распад радиоактивного источника происходит медленно во времени или очень быстро, применение его становится неэкономичным. В табл. 5.2 приведены изотопы — источники гамма-излучения, наиболее часто применяемые в строительстве (за исключением Na-24).

Таблица 5.2. Изотопы, применяемые в строительстве для получения гамма-излучения

Изотопы гамма-излучения	Энергия кванта в Мэв	Период полураспада	Коэффициент мощности дозы в $рм^2/кюри \cdot ч$
Co-60	1,17 и 1,33	5,26 года	1,34
Cs-137	0,662	30 лет	0,36
Ir-192	0,3—0,6	74 суток	0,51
Na-24	1,37 и 2,75	15,1 ч	2,2

**5.2.1.2. Взаимодействие проникающей радиации с веществом.** Фотон, проникающий в материал, может взаимодействовать с веществом следующим образом:

а) свободно пройти сквозь материал без всякого взаимодействия с атомами этого материала;

б) поглотиться атомом вещества, полностью утратив энергию  $W$  и возбуждив электрон, который оторвется от атома (рис. 5.1). Энергия поглощенного фотона частично используется для выполнения механической работы по отрыву электрона —  $\Phi$ , а остаток  $T$  передается электрону в виде кинетической энергии согласно уравнению

$$T = W - \Phi = h\nu - \Phi, \quad (5.2)$$

где  $\nu$  — частота поглощенного фотона;  $h$  — постоянная Планка, равная  $6,62 \times 10^{-27}$  эрг/с.

Явление выбивания электронов за счет поглощения фотона называется фотоэлектрическим эффектом или фотоэффектом.

Свободный электрон, который появляется в результате этого взаимодействия, быстро теряет кинетическую энергию за счет ионизации и в конце концов задерживается в материале. Очевидно, что условием такого взаимодействия является

$$h\nu > \Phi. \quad (5.3)$$

Вероятность фотоэлектрического эффекта тем определеннее, чем ближе  $h\nu$  к  $\Phi$ .

Фотоэлектрический эффект теряет свое самостоятельное значение при энергиях свыше 200 кэв, что характерно для использования гамма-излучения при неразрушающих испытаниях бетона. Это соображение не относится к источникам рентгеновского излучения;

в) фотон взаимодействует со свободным электроном или с электроном, слабо связанным с атомом (рис. 5.2). В этом случае фотон теряет часть своей энергии  $h\nu$ . В процессе взаимодействия появляется новый фотон с энергией  $h\nu'$ , меньшей, чем начальная энергия  $h\nu$ , на величину энергии переноса электрона —  $T$ :

$$T = h\nu - h\nu'; \quad (5.4)$$

фотон с энергией  $h\nu'$  отклоняется от первоначального направления движения на угол  $\delta$ . Этот процесс называется комптоновским рассеянием, или комптонэффектом.

На этом процессе взаимодействия следует остановиться, так как он позволяет установить тот факт, что фотон не поглощается полностью, а преобразуется в фотон с меньшей энергией, следовательно, с повышенными шансами быть поглощенным при следующем столкновении; кроме того, изменяется направление движения.

Комптоновский эффект для таких материалов, как бетон, является преобладающим при использовании радиоизотопов;

г) имеется, наконец, возможность для фотонов с предельной энергией  $h\nu$  при взаимодействии с атомом вещества образовать пару: электрон-позитрон (рис. 5.3):

$$h\nu = 2m_e c^2 + T_+ + T_-. \quad (5.5)$$

В равенстве (5.5)  $m_e$  масса электрона, а  $c$  — скорость света. Этот процесс практически не наблюдается в случаях  $\gamma$ -просвечивания бетона, когда энергия фотона превышает 1,2 Мэв.

Если закрытый источник проникающей радиации приблизить к поверхности бетонного массива, можно измерить интенсивность излучения, которое прошло бетонный массив. В этом случае необходимо, чтобы детектор излучения располагался с противоположной стороны массива; можно также измерить интенсивность отраженного излучения от бетонного массива. В этом случае источник и детектор излучения располагаются на одной поверхности, соответствующим образом разделенные экраном. Явление, на котором основаны такого рода измерения, называется регенеративным рассеиванием.

**5.2.1.3 Поглощение излучения.** Энергия фотонов составляет 0,2—3 Мэв, а ослабление излучения в единице объема комптоновского эффекта пропорционально количеству электронов, находящихся в этом объеме ( $n_e$ ), и эффективному сечению электрона ( $\sigma_e$ ):

$$\mu = n_e \sigma_e. \quad (5.6)$$

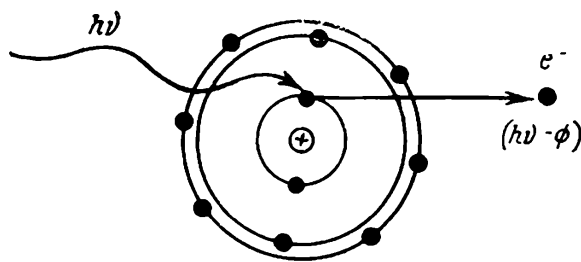


Рис. 5.1. Фотоэффект

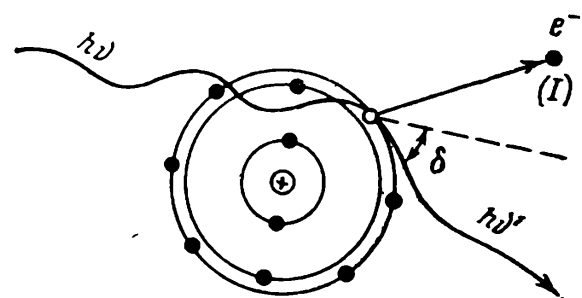


Рис. 5.2. Комptonэффект

Количество электронов в единице объема равно количеству атомов в таком же объеме  $n_A$ , умноженному на количество электронных оболочек атома  $Z$ :

$$n_e = n_A Z. \quad (5.7)$$

С другой стороны, количество атомов в единице объема  $n_A$  можно вычислить, зная постоянную Лошмидта  $N$ , атомный вес  $A$  и плотность материала  $\rho_d$ , согласно соотношению

$$n_A = N \frac{\rho_d}{A}. \quad (5.8)$$

Соотношение (5.8) содержит упрощенные величины в числителе и знаменателе, выражающие количество атомов в молекуле.

Если подставить выражение (5.7) и (5.8) в (5.6), последнее примет вид

$$\mu = N \frac{Z}{A} \sigma_e \rho_d. \quad (5.9)$$

Размерность для  $\mu$  определяется из

$$[\mu] = [M^{-1}] [L^2] [ML^{-3}] = [L^{-1}]; \quad (5.10)$$

величина  $\mu$  называется линейным коэффициентом ослабления.

Из выражения (5.9) видно, что  $\mu$  есть линейная функция от  $\rho$  для элементов из первой половины периодической системы Менделеева за исключением водорода, поэтому

$$\frac{Z}{A} \approx 0,5, \quad (5.11)$$

поскольку другие величины в формуле (5.9) — универсальные постоянные.

Практически все элементы, входящие в состав бетона, а именно: кислород, кремний, алюминий, железо, углерод, кальций, сера, хлор, магний, натрий и т. д., отвечают требованиям (5.11). Таким образом, существует линейная связь указанного отношения (5.9) между плотностью бетона и его линейным коэффициентом ослабления [5].

Чтобы определить, как изменяется интенсивность излучения в зависимости от толщины материала, пропускающего излучение, выделим слой материала толщиной  $dx$  и шириной по всему элементу (рис. 5.4). Снижение ин-

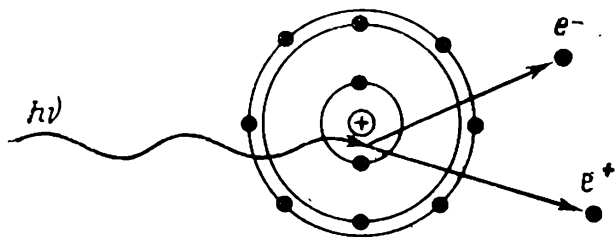


Рис. 5.3. Образование пары

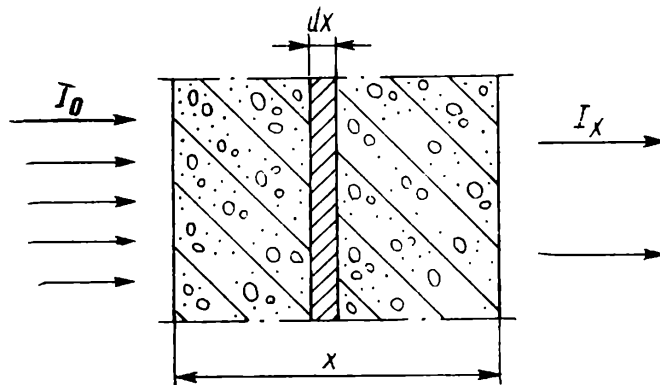


Рис. 5.4. Схема для вывода закона поглощения излучения

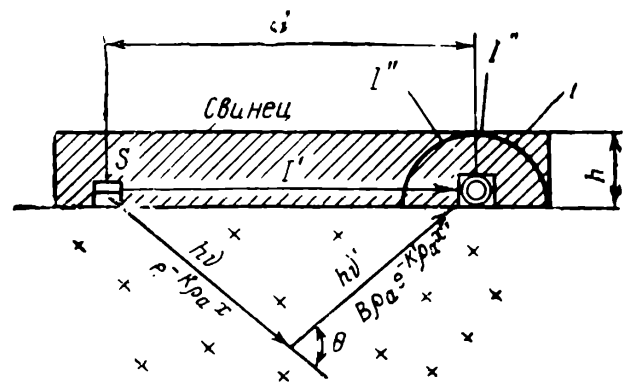
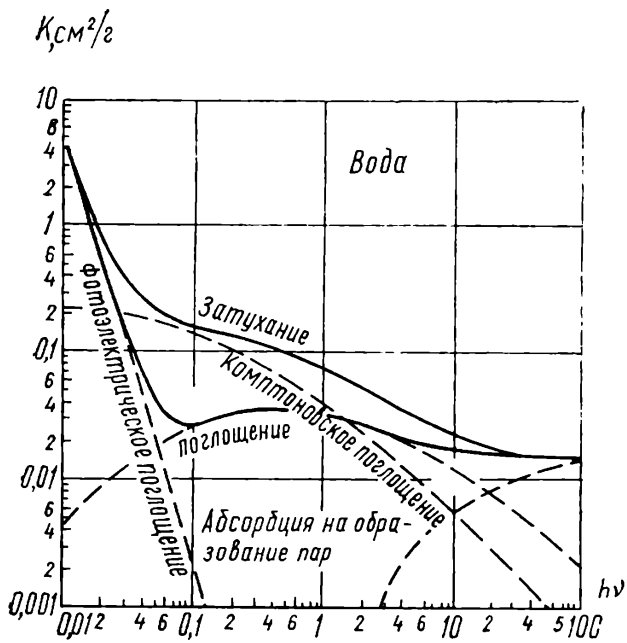


Рис. 5.6. Схема регенеративного рассеяния гамма-излучения

Рис. 5.5. Изменение массового коэффициента ослабления энергии фотонов (в воде)

интенсивности потока  $\gamma$ -частиц в слое может быть пропорционально падающему потоку, линейному коэффициенту ослабления  $\mu$  и объему слоя  $dx$ , согласно выражению

$$dI = -\mu I dx; \quad (5.12)$$

знак (—) показывает, что речь идет о снижении интенсивности потока  $\gamma$ -частиц. Если проинтегрируем отношение (5.12) в функции  $x$  в пределах значений  $I_0, I_x$ , то получим

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}, \quad (5.13)$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего излучения;  $I_x$  — интенсивность излучения после прохождения слоя толщиной  $x$ .

Зависимость (5.9) между линейным коэффициентом ослабления и плотностью иногда устанавливается в виде

$$\frac{\mu}{\rho d} = K, \quad (5.14)$$

где постоянная  $K$  называется массовым коэффициентом ослабления, поскольку представляет собой ослабление массы с единицы поверхности и имеет размерность

$$[K] = [L^{-1}] [M^{-1} L^3] = [L^2 M^{-1}]. \quad (5.15)$$

Эта постоянная измеряется в  $см^2/г$ . Массовый коэффициент ослабления — величина постоянная для определенной энергии падающего фотона и определяется при заданном значении  $\sigma_e$  из соотношения (5.9). На рис. 5.5 приведены графики зависимости массового коэффициента ослабления в воде от энергии падающего фотона.

Энергия фотонов в пределах от 0,8 до 2 Мэв достаточна для просвечивания всех видов бетонов с массовым коэффициентом ослабления в пределах

$$\frac{\mu}{\rho d} = 0,045 - 0,05 \text{ см}^2/г \quad (5.16)$$

**5.2.1.4. Закон о регенеративном рассеянии.** Еще один путь получения информации о свойствах материала заключается в наблюдении излучения в виде регенеративного рассеяния в материале. В этом случае источник излучения и детектор размещают по одной стороне элемента (рис. 5.6). Детектор экранируют свинцом от прямого излучения  $I'$  и космического излучения  $I''$  (см. рис. 5.6). Условия эффективного измерения [7]

$$I \gg I'' + I', \quad (5.17)$$

где  $I$  — интенсивность излучения при регенеративном рассеивании, которое может быть принято в виде:

$$I = B\rho_d e^{-K\rho_d}, \quad (5.18)$$

где  $B$  — коэффициент рассеивания.

Уравнение (5.18) предполагает известным и постоянным расстояние от источника до детектора; независимой переменной является плотность  $\rho_d$ . Если представить интенсивность излучения у детектора в зависимости от плотности материала  $\rho_d$ , для заданного расстояния источник — детектор ( $d = 20$  см), то получим кривую, приведенную на рис. 5.7, с максимумом в зоне плотности менее  $1$  г/см<sup>3</sup>. Положение максимума зависит от расстояния излучатель — приемник и желательно, чтобы это расстояние было достаточно большим (для кобальта-60,  $d = 20 \div 25$  см). Этот способ не дает достаточно точных результатов, поскольку одной определенной интенсивности обнаруженного излучения соответствуют два значения плотности, однако при исследовании в бетоне такой неопределенности не наблюдается, так как все измерения относятся к нисходящей ветви кривой по рис. 5.7.

Метод регенеративного рассеяния можно применять при проверке толщины материала. Количество импульсов увеличивается одновременно с увеличением толщины материала до определенного ее значения (рис. 5.8). В этом интервале измерение регенеративного рассеяния нельзя использовать для определения плотности. Наоборот, если плотность известна, этот способ может быть использован для измерения толщин. Для толщин более

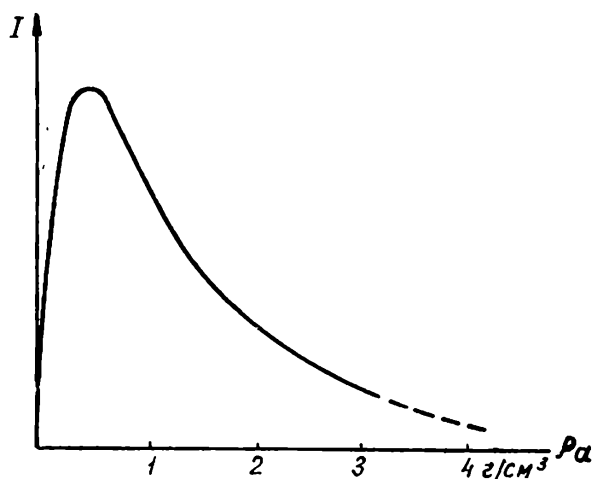


Рис. 5.7. Изменение интенсивности излучения при регенеративном рассеивании фотонов в зависимости от плотности материала

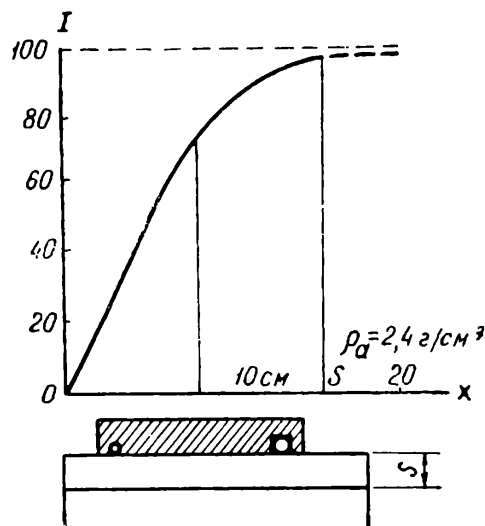


Рис. 5.8. Изменение интенсивности излучения при регенеративном рассеивании фотонов в зависимости от толщины материала

С кривая на рис. 5.8. превращается в горизонтальную прямую — интенсивность излучения при регенеративном рассеянии больше не зависит от толщины материала. В этом интервале метод может быть использован для определения плотности материала. Толщина предельного слоя  $S$  зависит от жесткости излучения и плотности материала. Предельная толщина бетона при использовании излучения кобальта-60 равна 12—13 см [8, 9]

**5.2.1.5. Принцип детектирования (обнаружения) проникающей радиации.** Обнаружение проникающей радиации основывается на свойствах ее взаимодействия с веществом (см. п. 5.2.1.2): фотоэлектрического эффекта, эффекта Комптона или эффекта образования пар. Как следствие этого взаимодействия, происходит рассеяние электронов с определенной кинетической энергией, достаточной, чтобы ионизировать среду. Возникшие ионы с положительным или отрицательным зарядом создают электрический ток, направленный к полюсу противоположного заряда. Этот ток может быть измерен. На аналогичном принципе детектирования основывается и детектирование полупроводниками (см. п. 5.2.2.4).

Другой тип детектирования основывается на том, что при попадании фотона в атом вещества его энергия оказывается выше за счет превышения скорости движения фотона (скорости света) над скоростью света в данном веществе. Происходит резкое торможение, которое сопровождается вспышкой — выделением светового кванта. Если высвобожденная энергия проявляется в виде кратковременного свечения ( $t < 10^{-6}$  с), явление называется флуоресценцией и на нем основывается детектирование со сцинтилляцией. Обнаружение радиации возможно химическим путем (химическое детектирование). Известно, что поток излучения приводит к распаду некоторых молекул. Этот распад молекул вещества в дальнейшем можно наблюдать микроскопически. Таким образом, например, зерна бромистого серебра фотоэмульсии после проявления темнеют, так как образуются зародыши металлического серебра. В этом заключается принцип детектирования, основанного на фотографическом процессе.

**5.2.1.6. Защита от проникающей радиации.** Проникающая радиация оказывает вредное влияние на человеческий организм. Поэтому необходимо принимать меры по ограничению ее влияния, принимая во внимание степень опасности.

Радиоактивными веществами считаются все вещества, удельная активность которых больше 1 мккюри/кг или у которых полная активность больше  $10^{-5}$  мкюри. Относительно применения энергии излучения в строительстве следует отметить, что для рентгеновского излучения берется диапазон 50—300 кэв, а для гамма-излучения — 0,3—3 Мэв.

Источники гамма-излучения, а также уран и другие тяжелые металлы хранят в свинцовых контейнерах, толщина стенок которых зависит от природы радиоизотопов и активности источника. В радиометрии для обычного источника кобальта-60 и цезия-137, активность которых находится в пределах 1—30 мкюри, толщина стенок контейнера соответственно равна 4 и 7 см. В радиографии за источник обычно принимают иридий-192, цезий-137 и кобальт-60 активностью между 100 мкюри и 10 кюри, которым соответствуют контейнеры со свинцовыми стенками толщиной между 8 и 16 см.



Контейнеры, предназначенные для получения первичных данных в лабораторных условиях, необходимо проверять после каждого эксперимента и после окончания всей работы.

Хранение контейнеров с радиоизотопами предусматривается на специальных складах, расположенных ниже поверхности земли.

Транспортирование источников гамма-излучений производится специальным транспортом.

## 5.2.2. Аппаратура для создания и детектирования проникающей радиации

**5.2.2.1. Установки рентгеновского излучения. Гаммадефектоскопы. Ускорители.** Для получения рентгеновского излучения пользуются установкой, состоящей из двух основных частей: жесткой рентгеновской трубки и блока питания и контроля (рис. 5.9). В свою очередь, блок питания и контроля разделяется на две подгруппы приборов: подгруппа контроля и регулировки и генератор высокого напряжения (см. рис. 5.9). Вся установка ограждена защитной сеткой.

Подгруппа контроля и регулировки обеспечивает циркуляцию масла для охлаждения экрана, регулирует силу тока в трубке путем изменения накала нити, а также поддерживает необходимое напряжение в группе высокого напряжения.

Группу высокого напряжения представляет трансформатор, который повышает напряжение от заданной величины в сети до величины, необходимой для ускорения вылета электронов из нити накала рентгеновской трубки.

Жесткая рентгеновская трубка составляет часть установки, в которой получают излучение. Существуют два типа трубок в зависимости от применяемого метода для генерирования электронов: ионная рентгеновская трубка и электронная лампа с ориентированным вакуумом. В ионной рентгеновской трубке с холодного катода в результате бомбардировки положительными ионами, для существования которых необходимо определенное давление газа, вылетают электроны. В рентгеновской трубке с ориентированным вакуумом свободные электроны вылетают с нагретого катода, которым является нить накала, используя потенциал вывода (пучка). Оба типа трубок имеют анод и экран, о который ударяются электроны, в результате чего и возникает

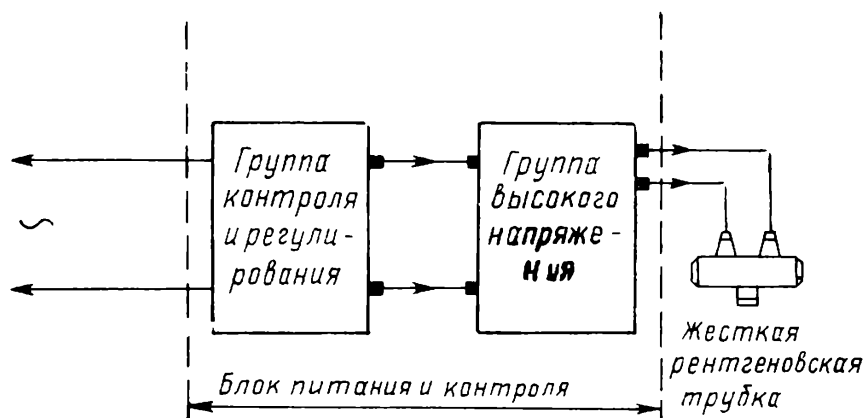
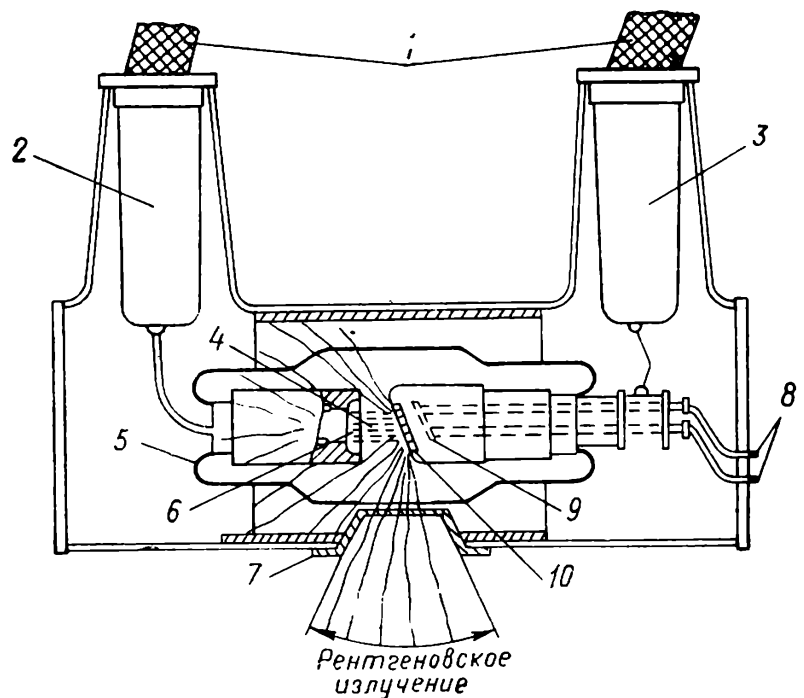


Рис. 5.9. Установка для получения жесткого рентгеновского излучения

Рис. 5.10. Схема рентгеновской трубки с ориентированным вакуумом

1 — кабель питания; 2 — катод; 3 — анод; 4 — электроны; 5 — каркас трубки; 6 — нагретая нить накала; 7 — окошко; 8 — трубки холодильной установки; 9 — механизм охлаждения антикатада; 10 — антикатод



рентгеновское излучение. Этот экран иногда называют антикатодом. Экран изготавливают из металла с большим атомным весом и повышенной точкой плавления. Такой материал нужен для большей эффективности торможения, а также для того, чтобы выдерживать нагрев, возникающий в ходе этого процесса. На рис. 5.10 дано сечение рентгеновской трубки с ориентированным вакуумом, в которой применяется горячий катод в виде нагретой проволоки, заключенной в металлический цилиндр с отверстием.

Длина волны излучения в рентгеновской трубке, ограниченная нижним пределом  $\lambda_{\text{мин}}$ , описывается выражением

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{hc}{eV}, \quad (5.19)$$

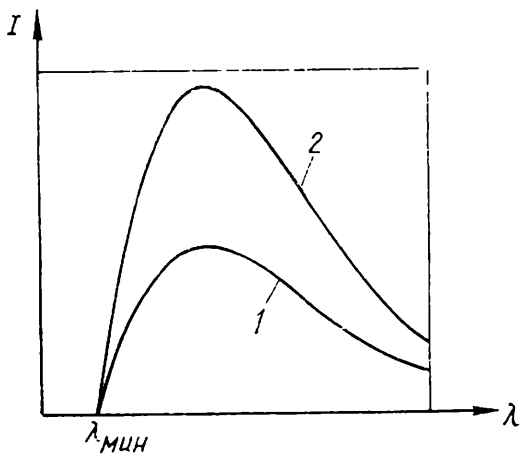
где  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света;  $e$  — заряд электрона;  $V$  — ускорение напряжения (давления) электрона ( $eV$  — кинетическая энергия).

Следует упомянуть, что при нижнем граничном пределе длины волны рентгеновская трубка излучает практически непрерывный спектр испускания.

На рис. 5.11 приведен спектр рентгеновского излучения для двух разных сил тока в трубке. На рис. 5.12 показан спектр рентгеновского излучения для двух разных напряжений ускорений электрона. Из графика следует, что жесткость излучения увеличивается в зоне, показанной обратной штриховкой, в которую перемещается максимум спектра.

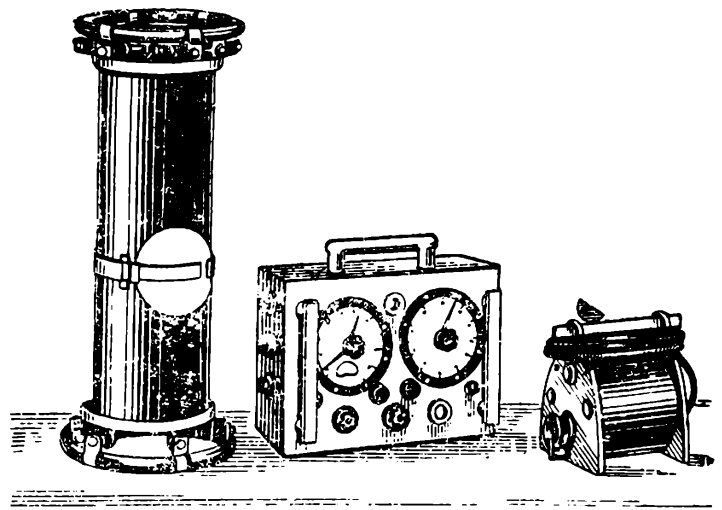
В настоящее время конструируют трубки на ускорение напряжения в пределах 10—2000 кВ. Область применяемых частот в рентгеновских трубках для контроля качества бетона на строительстве соответствует напряжениям между 200 и 350 кВ. Введение системы охлаждения экрана с помощью газа позволяет снизить вес трубки [10]. На рис. 5.13 представлена рентгеновская установка с газовым охлаждением мощностью 300 кВ для радиографии на производстве.

Другой метод, который в последнее время широко применяется в промышленности, — рентгеноскопия. Трудности метода заключаются в созда-

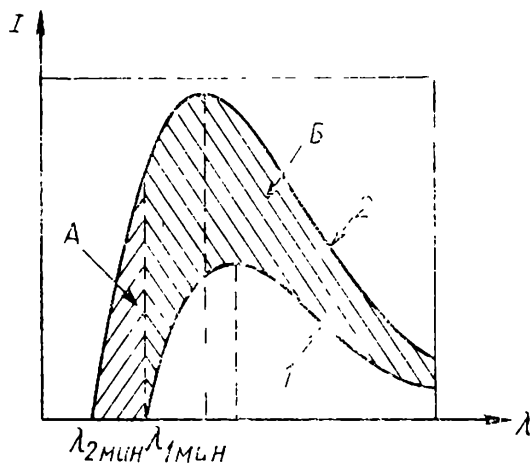


**Рис. 5.11.** Спектр рентгеновского излучения для разной силы тока

1 — для пониженной силы тока; 2 — для повышенной силы тока

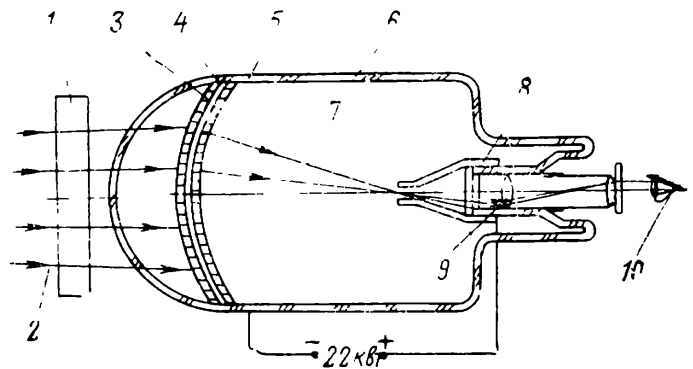


**Рис. 5.13.** Рентгеновская установка мощностью 300 кв с газовым охлаждением



**Рис. 5.12.** Спектр излучения для различного напряжения

1 — для пониженного напряжения; 2 — для повышенного напряжения; А — длина волны увеличивается с увеличением напряжения; Б — длина волны увеличивается с силой тока



**Рис. 5.14.** Усилитель изображения

1 — образец; 2 — рентгеновское излучение; 3 — слой носителя; 4 — флуоресцирующий экран; 5 — фотокатод; 6 — стекло; 7 — фотоэлектрон; 8 — экран наблюдения; 9 — свет; 10 — смотровая щель

нии экрана, чувствительного к жесткому излучению, и прибора, способного обеспечить увеличение контрастности получаемого таким образом изображения. Определенные успехи в этой области достигнуты в США и ФРГ. На рис. 5.14 представлено устройство, увеличивающее яркость изображения в 1000 раз [11].

Методы, применяемые при использовании гамма-излучения, предусматривают более простую аппаратуру. Гаммадефектоскоп типа IFA состоит из трех основных частей [12]: контейнера для хранения источника; блока управления, который позволяет извлекать источник из контейнера и перемещать его в намеченное место, а также возвращать в контейнер после испытания; излучающей головки, в которой закреплен источник в ходе экспозиции. Имеется возможность контроля положения источника и получения необходимой защиты в направлении маневрирования.

Все три основных элемента связаны гибкой трубкой из поливинилхлорида, в которой скользит гибкий трос для извлечения или загрузки источ-

ника в контейнер. Дефектоскоп снабжается также оптической системой сигнализации, которая показывает положение источника в любой момент: в контейнере, в трубке или излучающей головке.

Источники излучения, применяемые при дефектоскопии бетона: кобальт-60, цезий-137 или иридий-192.

Для испытания бетона большой толщины (свыше 50 см) можно применить ускорители частиц. В. А. Воробьев и А. М. Ананьев [13, 14] применяют портативный бетатрон (вес около 30 кг), установленный в точке испытания, который создает тормозное (рентгеновское) излучение с максимальной энергией в пределах 3—5 Мэв (рис. 5.15). Как известно, бетатрон [15] представляет собой ускоритель, способный значительно увеличивать энергию электрона, который передвигается по круговой траектории или близкой к круговой (рис. 5.16). Работа прибора осуществляется с помощью магнитного поля. Электрон вводят в барабан 3 с энергией 10—100 кэв, которая после ускорения достигает нескольких Мэв. После того как электроны достигают требуемой энергии, они отклоняются магнитным полем, приложенным в определенный момент на экран 2, создавая рентгеновское излучение, весьма жесткое, которое распространяется в том же направлении, что и частицы электрона, ударяющие по экрану (см. рис. 5.16).

Толщина бетона, которая может быть проверена с помощью этого прибора, достигает 150 см при продолжительности экспозиции около 2 ч, а для толщин в 100 см продолжительность экспозиции составляет всего 20 мин, однако размер снимка только 13 × 18 см.

**5.2.2.2. Детектирование, основанное на ионизации газа.** Проникающая радиация сама не является прямым ионизированным излучением, однако благодаря взаимодействию его с атомами вещества возникает возможность получения ионизационного эффекта (активные электроны с определенной кинетической энергией). Одним из ионизационных детекторов излучения в принципе может быть конденсатор. Внешний вид детектора может быть любой, но существуют основания для использования его в форме цилиндра (рис. 5.17). Центральный электрод—это нить, второй электрод — наружная оболочка, металлический кожух с опорным изолятором. Замкнутое пространство наполнено газом с большой способностью к ионизации [16, 17].

Ионизационным детектором, довольно часто применяемым в неразрушающих испытаниях бетона, является счетчик Гейгера—Мюллера. На рис. 5.18 показаны два основных типа таких счетчиков: с катодом на наружной стороне изоляции (а) и с катодом на внутренней стороне изоляции (б). Первому типу счетчиков оказывается предпочтение по сравнению со вторым, хотя он более тяжелый.

Отличие, которое характеризует работу счетчика Гейгера — Мюллера, — это особенность подсчета импульсов, работа счетчика основана на подсчете изменения скорости импульса в зависимости от напряжения, возникшего на его электродах. Считается, что вспомогательное устройство, к которому присоединяется детектор, чувствительно к импульсам, амплитуда которых больше 0,5 в.

Ни счетчики Гейгера — Мюллера, ни другие детекторы проникающей радиации не в состоянии реагировать на все количество падающих на них фотонов. Обычно регистрируется около 1% тех фотонов, которые взаимо-

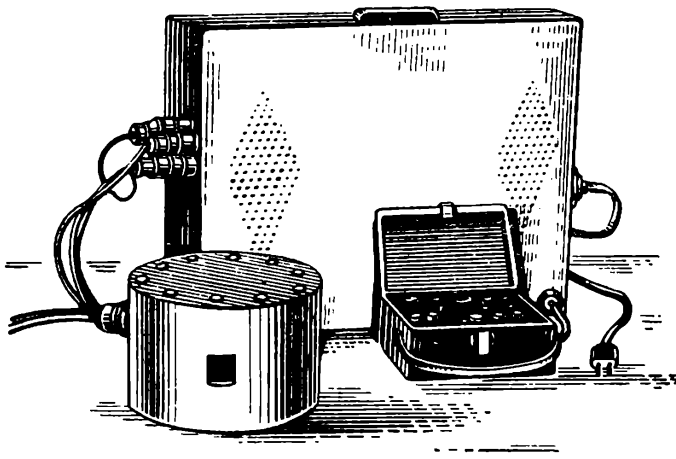


Рис. 5.15. Бетатрон портативный

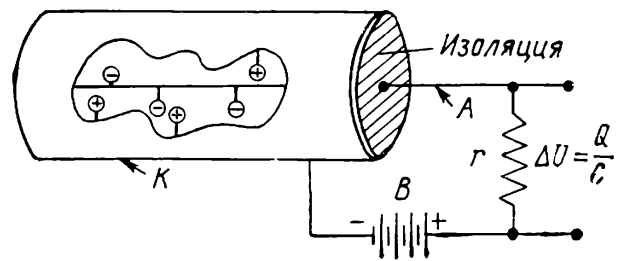


Рис. 5.17. Детектор для сбора ионов

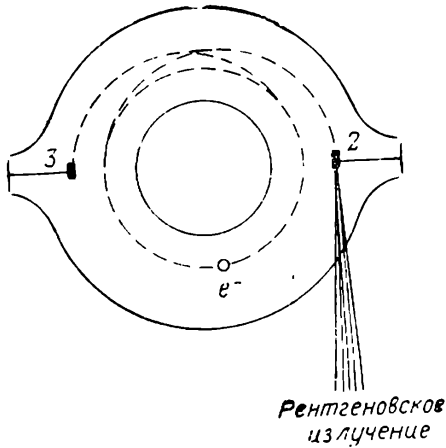


Рис. 5.16. Принципиальная схема бетатрона

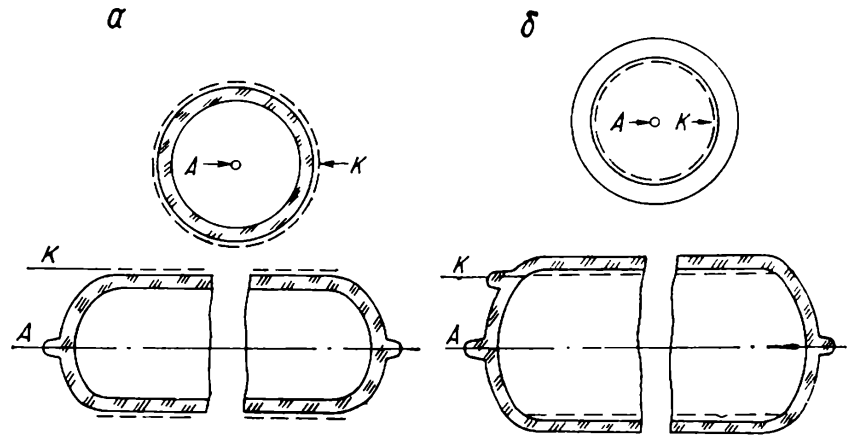


Рис. 5.18. Счетчик Гейгера — Мюллера

действуют с веществом детектора. Этот процент называется выходом счетчика.

**5.2.2.3. Сцинтилляционный счетчик** (рис. 5.19). Это новая категория детекторов, которые приобретают все более широкое распространение благодаря большей чувствительности и устойчивости во времени. Такой детектор состоит из трех основных частей:

а) кристаллический сцинтиллятор — часть детектора, в которой создаются вспышки света (сцинтилляции). Они возникают благодаря выделению световых квантов в результате взаимодействия  $\gamma$ -частиц с веществом.

Неорганическими сцинтилляторами — веществами, способными к флуоресценции, — являются: иодид натрия  $\text{NaI}(\text{TI})$  со следами талия, имеющий продолжительность излучения  $0,25 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ , и вольфрамат кальция  $\text{CaWO}_4$  с продолжительностью излучения  $10^{-6} \text{ с}$ . Среди органических сцинтилляторов следует упомянуть растворы: нафтадена с продолжительностью излучения  $6 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , антрацена с продолжительностью излучения  $3 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ , стилбена с продолжительностью излучения  $6 \cdot 10^{-9} \text{ с}$  и различные пластмассы, такие, как четырехфенольная пластмасса или терфенил в ксилоле;

б) ко второй части сцинтилляционного детектора относится фотоумножитель. Он воспринимает сцинтилляцию кристалла (или экрана) и преобразует в импульсы электрического тока или импульсы напряжения, полученные от большого количества электронов в результате разряда. Проследим,

как происходит этот разряд. Сцинтилляция, или излучение, кристаллом квантов света (фотонов) распространяется во всех направлениях, и только часть из них попадает на наружную сторону фотоумножителя, которая называется фотокатодом. Фотокатод покрыт слоем полупроводника, в котором возникает сильный фотоэлектрический эффект. Большая часть квантов света свободно проходит сквозь этот слой, но около 10% взаимодействуют с фотоэлектрическим слоем и превращаются в свободные электроны по схеме: фотон-фотоэлектрон. Эти фотоэлектроны, получив ускорение, попадают в вакуумный прибор на первый электрод, который имеет положительный потенциал по сравнению со слоем фотокатода (см. рис. 5.19). Электроды фотоумножителя покрыты слоем, который способен к сильному вторичному электронному излучению. Под влиянием удара летящего электрона с первого электрода излучается до 5 вторичных электронов. Они получают ускорение и притягиваются вторым электродом, имеющим положительный потенциал по сравнению с первым. В результате удара по второму электроду может возникнуть до 25 электронов и т. д. Таким образом происходит такое увеличение количества электронов, что на выходе фотоумножителя получается значительный импульс тока. Время, за которое увеличивается количество электронов в фотоумножителе, не превышает времени затухания сцинтилляции в кристалле;

в) фотоумножитель связан с предусилителем. Он служит для повышения уровня импульса напряжения, полученного от фотоумножителя, до уровня, который может передаваться по кабелю на любое расстояние для того, чтобы ввести импульс в счетчик.

**5.2.2.4. Светочувствительные детекторы.** Светочувствительные детекторы применяются в радиографии бетона и железобетона. Преимущество их заключается в том, что измерение ими может быть в дальнейшем проверено, а также пригодно для многократного использования.

В радиографии используются чувствительные к излучению пленки типа фотопленок, но более сложного строения. Пленка, чувствительная к жесткому излучению, состоит из 7 слоев прозрачной основы (подложки) из триацетата целлюлозы; по обеим сторонам этого слоя расположены очень тонкие слои вещества, которые обеспечивают сцепление эмульсии с основой; по слою эмульсии, состоящей из мелких кристаллов галоидной соли серебра, укладывается суспензия желатина, по затвердевшим слоям суспензии желатина укладывается защитная эмульсия.

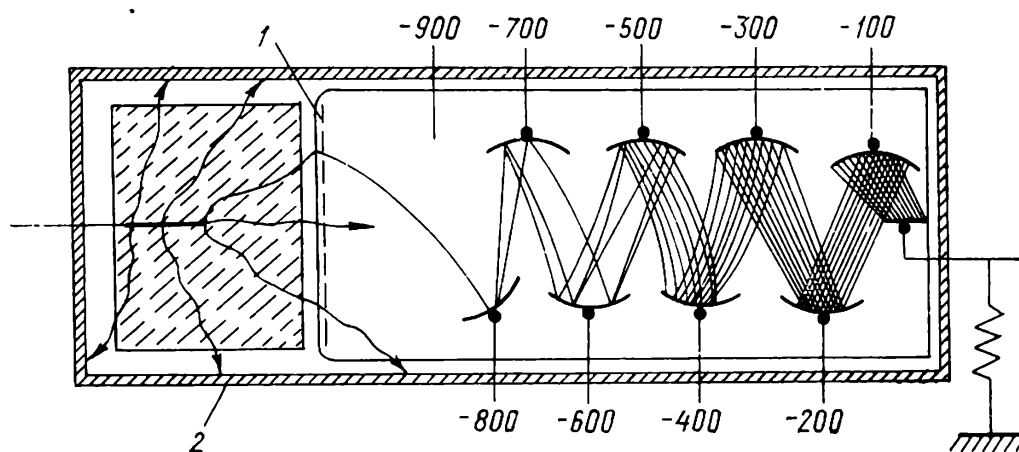


Рис. 5.19. Схема образования импульса в детекторе со сцинтилляцией  
1 — фотокатод; 2 — оптический экран

Два слоя эмульсии обеспечивают большую скорость экспозиции и более контрастное изображение, чем обыкновенная фотопленка.

Процесс воздействия проникающей радиации на фотографическую эмульсию аналогичен действию света; однако коэффициент полезного действия много меньше. При взаимодействии между проникающей радиацией и эмульсией выделяется электрон высокой энергии, способный ионизировать эмульсию, например:



В дальнейшем ионы серебра захватывают свободные электроны, которые находятся в эмульсии и переходят в металлическое серебро:



Этот процесс в светочувствительном слое, состоящем из зерен бромистого серебра, создает изображение, называемое скрытым, затем, действуя на частицы бромистого серебра проявителем, получают видимое изображение.

### 5.2.3. Применение метода проникающей радиации

**5.2.3.1. Дефектоскопия бетона с помощью радиографии.** Определение внутренних дефектов бетона является важной задачей контроля качества бетона в сооружениях [19, 20, 21]. Для этого может быть эффективно использована проникающая радиация.

Ограничениями для применения такого метода являются стоимость пленки и предельные толщины бетона, а именно:

до 35—40 см — рентгеновская установка, 300 кВ и свинцовые экраны;

до 40—45 см — рентгеновская установка, 300 кВ и флуоресцирующие экраны;

до 45—50 см — источник гамма-излучения (кобальт-60) и свинцовые экраны;

до 50—60 см — источник гамма-излучения (кобальт-60) и флуоресцирующие экраны.

При толщине более 60 см могут быть использованы бетатроны — ускорители частиц (см. п. 5.2.2.1).

Дефекты, которые могут быть исследованы с помощью радиографии: пустоты, зазоры в стыках, зоны с крупными порами, трещины, плоскость которых параллельна направлению излучения. Одновременно с локализацией зоны, в которой необходимо выполнить радиографию, выбирают источник излучения и геометрические данные для экспозиции. Наиболее эффективно можно исследовать бетон при толщине, не превышающей 30 см.

Площадь пленки должна быть достаточно большой с тем, чтобы она превышала контур предполагаемого дефекта, и располагать ее следует со стороны, более близкой к дефекту.

Источник излучения центрируют по отношению к исследуемому дефекту и выбирают максимальное расстояние между источником и пленкой, которое допускается соответствующим временем экспозиции.

Параметры экспозиции определяют таким образом, чтобы плотность затемненного участка пленки на нормальном бетоне находилась между 0,6

и 1. Пониженная плотность необходима для получения снимка дефекта плотностью между 2 и 3, т. е. такой величины, которая обеспечивает оптимальную контрастность между дефектом и нормальным бетоном.

В табл. 5.3 приведены для ориентировки параметры экспозиции, рекомендуемые для дефектоскопии бетона с помощью рентгеновского излучения с использованием пленки OR-WO RF-5 и свинцовых экранов на расстоянии между щелью и пленкой 40 см.

Таблица 5.3. Параметры экспозиции для рентгеновской дефектоскопии

Толщина бетона в см	$v$ , кв	$I$ , mA	$t$ , мин	$E_x$ mA × × мин/дм <sup>2</sup>	Толщина бетона в см	$v$ , кв	$I$ , mA	$t$ , мин	$E_x$ mA × × мин/дм <sup>2</sup>
5	80	5	4	0,99	15	120	5	5	1,24
7	85	5	4	0,99	17	130	5	5	1,24
9	95	5	4	0,99	19	140	5	6	1,48
11	100	5	5	1,24	21	150	5	7	1,73
13	110	5	5	1,24	23	160	5	8	1,98
					25	170	5	10	2,47

Коэффициент экспозиции рентгеновского излучения можно представить в таком виде:

$$E_x = \frac{It}{d^2}, \quad (5.23)$$

где  $I$  — сила тока в трубке в mA;  $t$  — время экспозиции в мин;  $d$  — расстояние от фокусного пятна до пленки в дм.

Коэффициент, соответствующий данному ускоряющему напряжению, может быть изменен в формуле (5.23) таким образом, чтобы принятая величина  $E_x$  осталась без изменения. Вместо фокального расстояния  $d_1$  принимают другое расстояние  $d_2$ , а величину нового времени экспозиции  $t_2$  на расстоянии  $d_2$  выражают в зависимости от времени экспозиции  $t_1$  и расстояния  $d_1$ . Эти величины связывают уравнением, называемым законом квадратов расстояний:

$$t_2 = t_1 \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^2. \quad (5.24)$$

Из предыдущего следует, что нужно учитывать в расчете ускоряющее напряжение, которое входит в формулу

$$ItV^{5,5} = K. \quad (5.25)$$

Постоянную  $K$  необходимо использовать для определения толщины материала.

Радиография может выполняться с экспозицией по табл. 5.3 и в тех случаях, когда используются свинцовые экраны; значение времени, определенное по табл. 5.3, умножают на 1,5, а если пользуются флуоресцирующими экранами, значение времени из той же таблицы делят на 8.

Для толщин более 25—30 см в настоящее время применяют гамма-излучение кобальта 60 или других радиоактивных веществ (см. п. 5.2.1.1). На



рис. 5.20 приведена характеристика экспозиции кобальта-60, определяемая из уравнения

$$E_{\gamma} = \Lambda t, \quad (5.26)$$

где  $\Lambda$  — активность источника в кюри;  $t$  — время экспозиции в ч.

Для получения радиограммы с оптической плотностью  $D=0,9$  для бетона с объемной массой в среднем  $\rho_d = 2300 \text{ кг/м}^3$  необходима высокочувствительная пленка с негативным изображением OR-WO RF-63, со свинцовым экраном в зависимости от толщины бетона  $\delta$ , которую должно преодолеть проникающее излучение, на различном расстоянии  $d$  между источником и пленкой.

Преимущество радиографического метода в определении пустот является наиболее очевидным. С помощью рентгеновского излучения можно определять пустоты, размер которых составляет до 5—6%, а для гаммаизлучения — до 10—12% от толщины проверяемого бетона. Для получения резкости изображения принимают значительное расстояние источник — пленка (80—120 см).

К другой группе дефектов, при выявлении которых радиография дает хорошие результаты, относятся дефекты заделки швов. Изображение шва получается четким, если кассету с пленкой располагают с видимой стороны шва [20]. Швы толщиной более 2—3 см легко обследуются с помощью гаммаграфии (гаммадефектоскопия, гаммардиография).

Категорию больших дефектов отождествляют с образованием макроскопической зоны [21]. Однако наилучшие результаты можно получить с помощью радиометрического метода (см. п. 5.2.3.2).

К последней категории дефектов, обнаруживаемых с помощью радиографии, относят волосные и крупные трещины. Для исследования трещины с помощью радиографии необходимо, чтобы плоскость ее была параллельна или приблизительно параллельна с направлением излучения. Этот метод может быть использован для определения глубины и ширины трещин в элементе [19, 30].

С помощью радиографии можно контролировать качество стыка. Можно точно определить качество заполнения и уплотнения стыка раствором и выявить волосные или крупные трещины между вновь уложенным раствором или бетоном и материалом «старого» элемента [4].

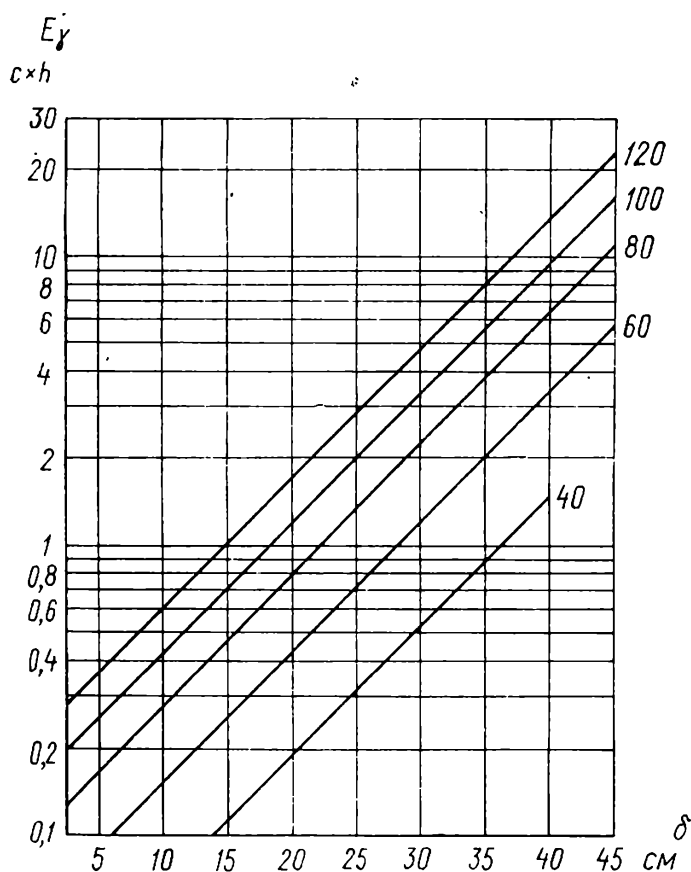


Рис. 5.20. Характеристика экспозиции для дефектоскопии Со-60, фотопленкой RF-3 и свинцовой фольгой в зависимости от толщины бетона

**5.2.3.2. Дефектоскопия бетона с помощью радиометрии.** Этот способ отличается от проверки бетона с помощью радиографии, здесь нет светочувствительной пленки, он основан на скорости счета импульсов и известен под названием радиометрического метода.

Метод использует гамма-излучение, достаточно жесткое для контроля значительной толщины бетона. Источником является цезий-137 или (чаще всего) кобальт-60. Радиоактивность, при которой проводят работы, составляет 1—30 *мкюри*. Имеется тенденция к повышению радиоактивности источника для контроля больших толщин, что одновременно увеличивает трудности в проведении защитных мероприятий.

Существенными проблемами метода являются:

разработка переносных приборов с обеспечением строго постоянных геометрических соотношений во время испытаний;

получение воспроизводимости измерений во времени.

На современной стадии технического развития известно, что наилучшим решением в этой области является применение сцинтилляционных детекторов с фотоумножителями и пересчетными устройствами, устойчивыми к изменениям температуры. Такие установки применяются в INCERC [22, 23].

Первая проблема была решена при помощи приспособления, приведенного на рис. 5.21, которым пользуются в INCERC для испытания железобетонных колонн. Приспособление состоит из жесткой трехсторонней рамки, которая с четвертой стороны имеет шарнирно-закрепленный элемент. По двум противоположным сторонам рамки расположены упоры для передачи давления на бетон, они могут автоматически закрепляться в любом положении на стойке. По двум другим элементам рамки могут передвигаться источник и детектор. Возможность регулировки по двум сторонам обеспечивает соосность системы источник — детектор, а уровень, закрепленный на рамке, обеспечивает горизонтальность. Приспособление может быть использовано при испытаниях колонн, имеющих максимальные размеры поперечного сечения  $40 \times 60$  см.

Принцип измерения основывается на различии поглощения гамма-излучения в пустотах, в арматуре или в бетоне. Поглощение по направлению излучения вычисляется из уравнения

$$x = b \left( \frac{\ln \frac{N_0}{N_x}}{\ln \frac{N_0}{N}} \right), \quad (5.27)$$

где  $b$  — размер колонны по направлению излучения;  $N_0$  — скорость счета, исключая бетон;  $N_x$  — скорость счета в направлении дефекта;  $N$  — скорость счета в направлении бетона нормального качества без пустот.

Если дефект не пустота, а постороннее включение, например глина или кирпичный щебень, поглощение дается выражением

$$x_e = \frac{b\mu_b - \ln \frac{N_0}{N_x}}{\mu_b - \mu_i}, \quad (5.28)$$

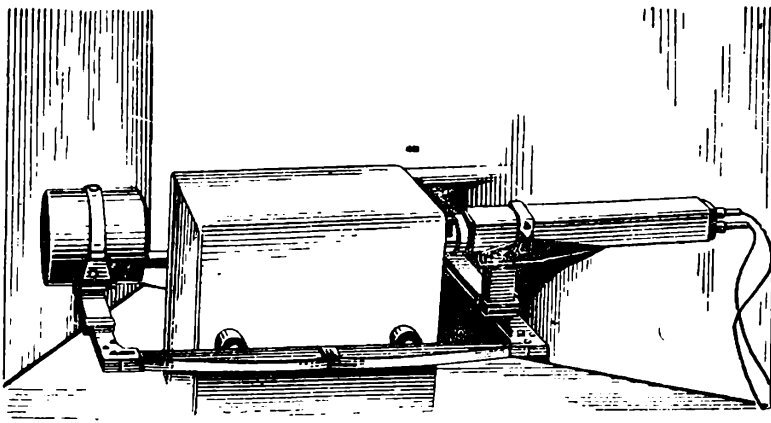


Рис. 5.21. Приспособление для испытания колонны радиометрическим способом (INCERC)

где  $\mu_b$  — линейный коэффициент ослабления в бетоне;  $\mu_i$  — линейный коэффициент ослабления в посторонних включениях; остальные обозначения имеют такие же значения, как и в уравнении (5.27).

В случае, когда в качестве источника применяют кобальт-60, выражение (5.28) можно принять в виде

$$x_e = \frac{\rho_b}{\rho_b - \rho_i} b - \frac{20}{\rho_b - \rho_i} \ln \frac{N_0}{N_x}, \quad (5.29)$$

где  $\rho_b$  — объемная масса бетона в  $г/см^3$  ( $\sim 2,3$ );  $\rho_i$  — объемная масса включений.

Выражение (5.29) было принято для определения размера пустот, полученных искусственным путем в бетоне с помощью специальных глиняных вкладышей. На рис. 5.22 приведены графики изменений скорости счета в поперечном сечении колонны, полученные с различным временем считывания (точки белые и черные) и различным диаметром пучка излучений (8 мм и 4 мм на обеих кривых). Используя данные из диаграммы и значения скорости счета во включении, получили, что диаметр дефекта равен 9,8 см.

Другой вид дефекта определялся в шве, в котором находились включения посторонних тел. Этот тип дефекта воспроизведен на участках призм, приведенных на рис. 5.23 и соответствующих им графиках. Исследования проведены в различных направлениях, позволяющих определить ориентацию шва.

Другая область дефектоскопии, в которой метод дает хорошие результаты, заключается в локализации зоны слабо уплотненного бетона. Исследования, выполненные на бетонных элементах с различной степенью виброуплотнения: хорошей (60 с), слабой (10 с) и без вибрации (0 с), показали (рис. 5.24), что как уровень скорости счета, так и однородность измеренных значений изменяются по мере того, как происходит переход от одного способа уплотнения бетона к другому. Изменения скорости счета резко отличаются, начиная от 41 000 *имп/мин* для бетона, хорошо провибрированного, и до 76 000 *имп/мин* для невибрированного бетона. Если эти изменения преобразовать в изменения линейного коэффициента ослабления, то различие между ними становится незначительным, а именно: бетон, хорошо вибрированный,  $0,105 \text{ см}^{-1}$ ; бетон, слабо вибрированный,  $0,097 \text{ см}^{-1}$ ; бетон невибрированный  $0,09 \text{ см}^{-1}$ , поэтому бетон необходимо характеризовать с помощью так называемого коэффициента степени уплотнения  $g_{vx}$  на толщину бетона  $x$ , определяемого уравнением

$$g_{vx} = \frac{N_0}{N}, \quad (5.30)$$

где  $N_0$  — скорость счета на воздухе;  $N$  — скорость счета на бетоне.

**5.2.3.3. Определение армирования с помощью радиографии.** С помощью проникающей радиации возможно определение положения и диаметра арматуры в бетоне.

В качестве источников проникающей радиации применяются такие же, как и в случае дефектоскопии (см. п. 5.2.3.1).

Рекомендуемые пленка и усиливающие экраны для радиографии были описаны в п. 5.2.3.1.

Размещать пленку необходимо как можно ближе к арматуре — требование, которое вытекает из принципов радиографии.

Источник излучения закрепляется на достаточно большом расстоянии от пленки, что является, с одной стороны, компромиссом между тенденцией в получении максимума контрастности и, с другой стороны, умеренным временем экспозиции. В этом случае обычное расстояние источник — пленка находится между 40 и 60 см.

В особых случаях, как, например, в плитах, расстояние источник — пленка небольшое (20—30 см).

Специальные методы позволяют устанавливать глубину, на которой находится стержень арматуры неизвестного диаметра в железобетонном элементе известной толщины  $b$ . Для этого применяют два треугольных свинцовых репера, расположенных на лицевой и обратной сторонах образца, затем производят два последовательных рентгеновских просвечивания на двух разных пленках с расположением источника в двух точках, размещенных на линии, параллельной поверхности образца (рис. 5.25).

Расстояние  $\bar{x}$ , на котором находится стержень по отношению к дальней стороне образца (пленка прилегает к этой стороне), определяется из выражения

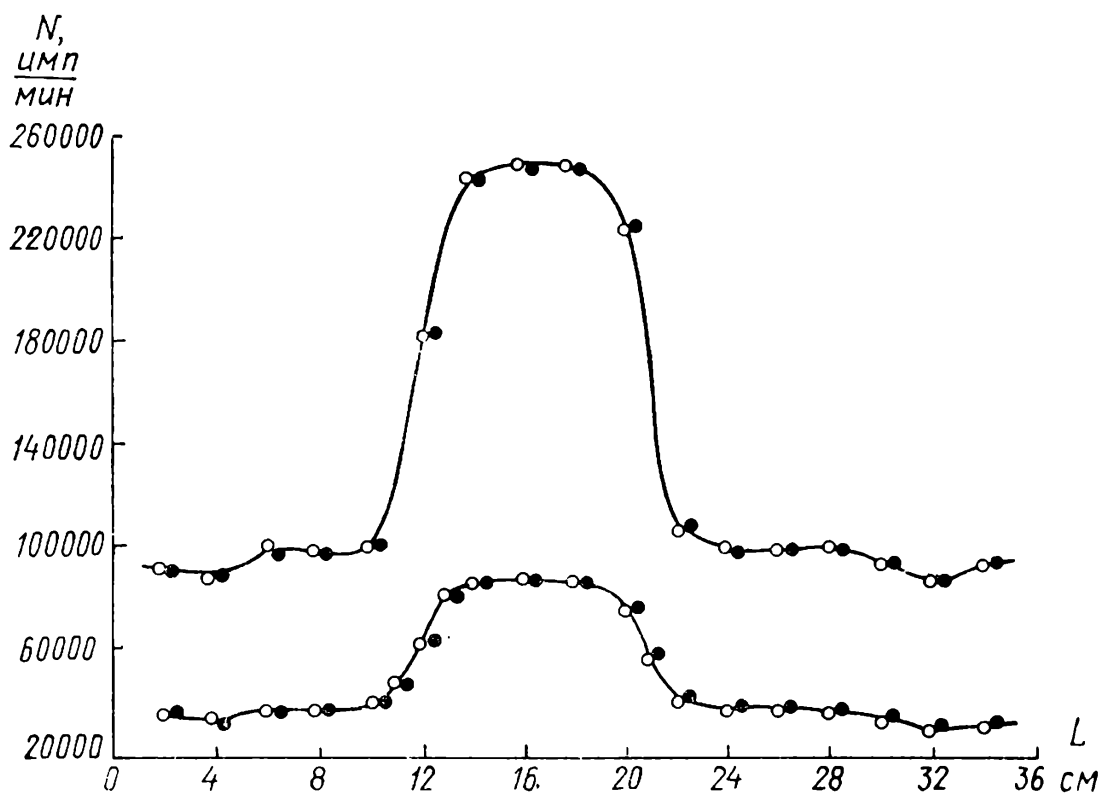


Рис. 5.22. Диаграмма скорости счета при испытании колонны с пустотами ( $b=25$  см)  
 ○ — экспозиция — 1 мин; ● — экспозиция 2 мин

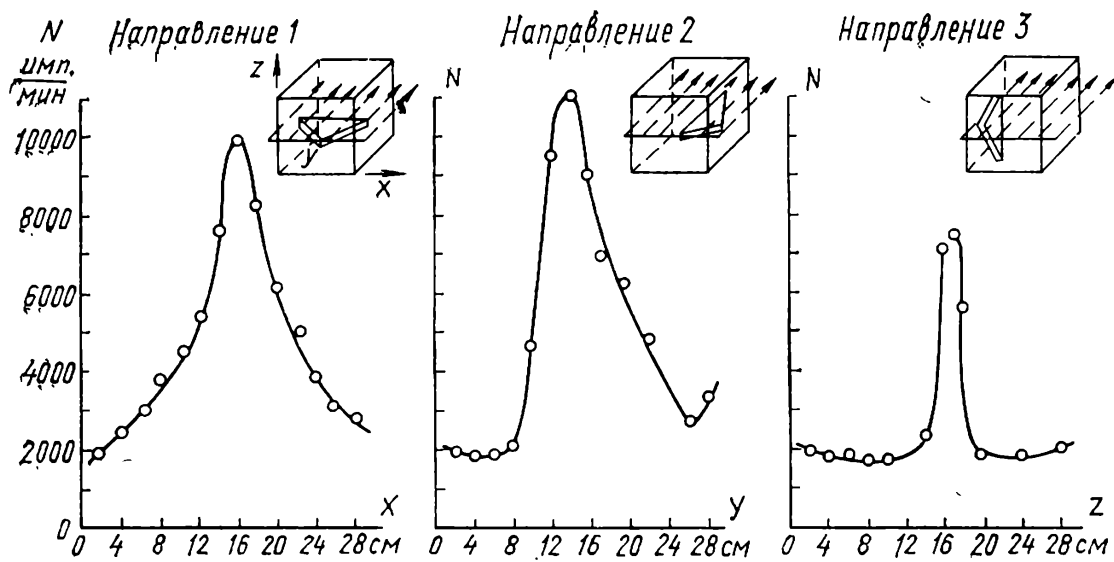


Рис. 5.23. Диаграмма скорости счета на участках колонны с треугольным швом

Рис. 5.24. Диаграмма скорости счета для бетонов разной степени уплотнения

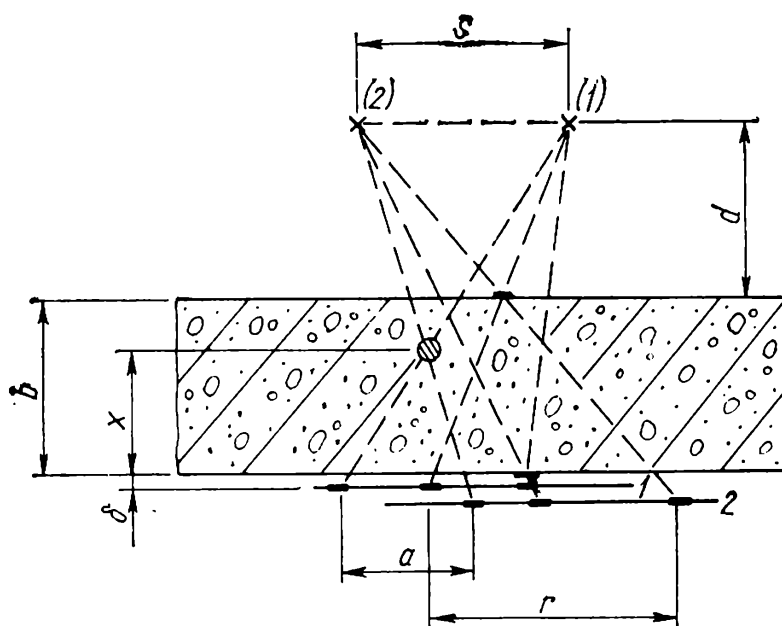
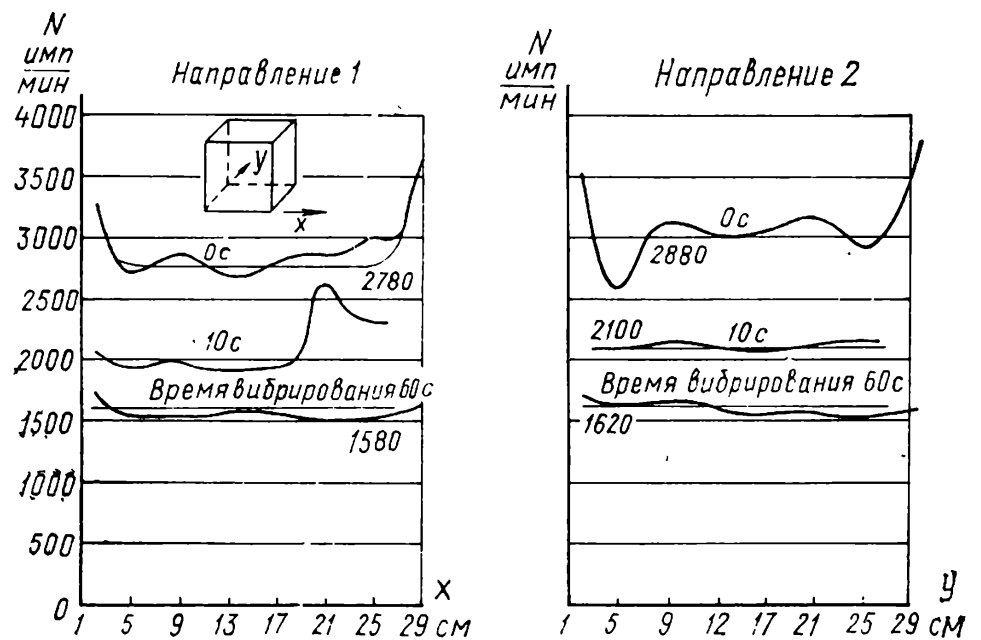


Рис. 5.25. Схема определения расстояния до арматуры в бетоне

$$x = b \frac{a}{r} - \delta, \quad (5.31)$$

где  $b$  — толщина образца;  $a$  — расстояние между изображением стержня на обших плечках при совмещении их в соответствии с положением реперов;  $r$  — расстояние между изображениями одного репера на лицевой стороне обеих пленок, когда пленки соответственно совмещены;  $\delta$  — расстояние от пленки до грани балки (около 0,5 см).

Если неизвестна толщина  $b$  балки, тогда необходимо измерить и расстояние  $S$  между положениями источников, а также расстояние от источника до лицевой стороны образца  $d$ . В этом случае толщина в элементе определяется уравнением

$$b = \frac{r}{s} d - \delta. \quad (5.32)$$

Если подставим выражение (5.32) в (5.31), получим расстояние стержня по отношению к тыльной стороне образца в случае, когда толщина элемента неизвестна:

$$x = \frac{a}{s} d - \delta \left( \frac{a}{r} + 1 \right). \quad (5.33)$$

В выражениях (5.31) и (5.33) предполагается, что толщина элемента меньше по сравнению с расстоянием  $d$ . Если  $b > d$ , вместо выражения (5.31) необходимо применить формулу

$$x = \frac{ad + ab - \delta s}{s + a}, \quad (5.34)$$

которая включает больше элементов известных и неизвестных. Последним слагаемым в числителе формулы (5.34) можно пренебречь, тогда уравнение примет более простой вид:

$$x = \frac{a(d + b)}{s + a}. \quad (5.35)$$

Если толщина в элементе неизвестна, применяют формулу

$$x = \frac{ad(s + r)}{s(s + a)}, \quad (5.36)$$

которая получается благодаря введению величины  $b$ , взятой в (5.32) и подставленной в (5.35).

Параметры экспозиции для радиографии арматуры с помощью рентгеновского излучения приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Параметры экспозиции в радиографии

Толщина бетона в см	$v$ , кв	$I$ , мА	$t$ , мин	$E_x$ тАх X <sub>мин/дм²</sub>	Толщина бетона в см	$v$ , кв	$I$ , мА	$t$ , мин	$E_x$ тАх X <sub>мин/дм²</sub>
5	90	5	3	0,94	15	140	5	5	1,57
7	100	5	3	0,94	17	150	5	6	1,87
9	110	5	3	0,94	19	160	5	7	2,2
11	120	5	4	1,25	21	170	5	8	2,5
13	130	5	4	1,25	23	180	5	10	3,14
					25	190	5	15	4,7

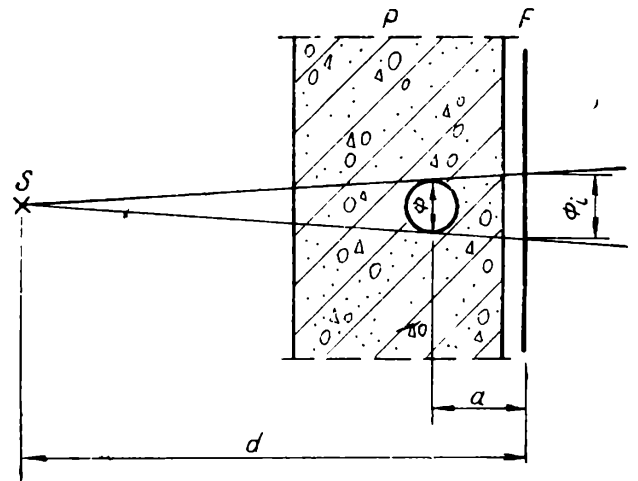
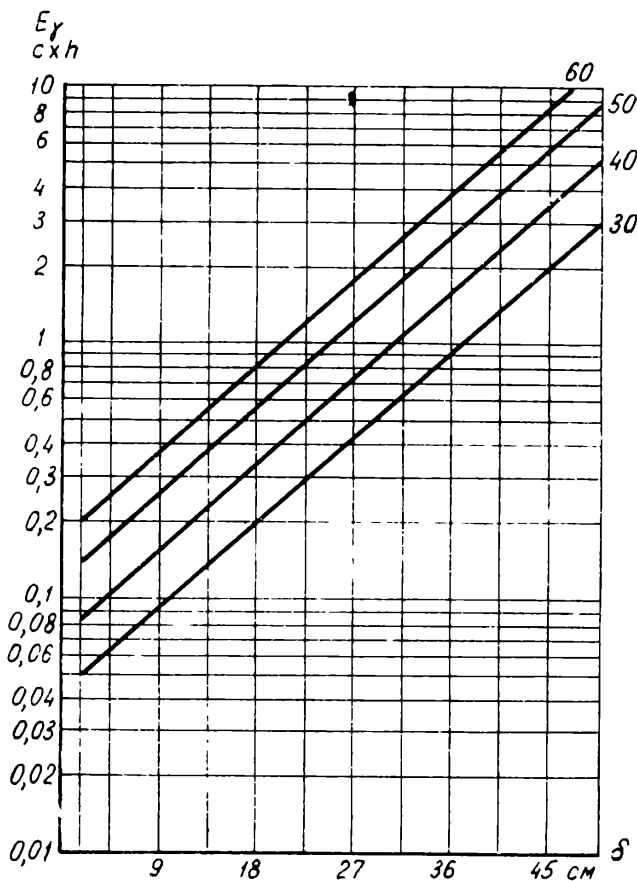


Рис. 5.27. Схема определения фактического диаметра стержня

Рис. 5.26. Изменение логарифма постоянной  $k'$  в зависимости от толщины бетона

Условия для испытания следующие: расстояние источник — пленка 40 см; свинцовые экраны различной толщины; пленка OR-WO RF-5.

На рис. 5.26 приведены графики изменения логарифма постоянной  $k'$  в зависимости от проверяемой толщины бетона. К обычным элементам, пригодным для радиографии, относятся плиты, балки и колонны.

Радиография плит проводится наиболее просто. Главное преимущество состоит в небольшой толщине элемента (9—15 см), которая благоприятствует получению рентгеновских снимков хорошего качества при небольшом времени экспозиции. Для полного установления арматуры рекомендуется радиография как в центральной зоне, так и на опоре.

Радиография в пролете преследует цель уточнить арматуру, необходимую для восприятия положительного момента по одному или по двум направлениям. Рекомендуется применять пленки с большой площадью (минимум 30 × 40 см) и наибольшее расстояние источник — пленка, которое уменьшает искажение изображения на пленке. При радиографии одного стержня фактическим диаметром  $\varnothing$ , уложенного в бетон, имеем: собственно плиту  $P$ , один источник  $S$  и пленку  $F$ , расположенную на расстоянии  $d$  между ними, отсюда следует в соответствии с рис. 5.27, что

$$\varnothing = \varnothing_i \left( 1 - \frac{a}{d} \right), \quad (5.37)$$

где  $a$  — расстояние стержень — пленка, которое может быть в этом случае принято как защитный слой для арматуры.

Из формулы (5.37) следует, что поправочный коэффициент отличается от 1 тем меньше, чем величина  $d$  больше и  $a$  меньше.

Значительный прогресс в технике радиографии железобетонных плит был достигнут путем применения антирассеивающей решетки; техника ее применения изложена в работе [24].

Радиография балок также довольно распространена. Радиографирование рекомендуется проводить по толщине балки, чтобы использовать более короткий путь для излучения.

Арматуру в балке выявляют, начиная с зоны максимального момента. Задачей первого снимка является определение количества рядов, в которых расположена арматура в пролете. С этой целью в зоне радиографии под балкой устанавливают по ширине балки небольшой бетонный блок. Источник излучения располагают на уровне оси, проходящей через середину нижнего ряда стержней (около 3—4 см от основания балки) и на довольно большом расстоянии от пленки ( $d = 50 \div 60$  см). В этом случае радиография схематично показана на рис. 5.28, а. Если стержни расположены в один ряд, то на рентгеновском снимке появляется просто горизонтальная полоса. Если стержни расположены в два ряда, на снимке появляется также горизонтальная полоса, как и в предыдущем случае, или широкая лента, которая маскирует второй ряд стержней. В этом случае для радиографии следует источник излучения разместить по отношению к расположению стержней в точках  $S_1$  и  $S_2$  в зависимости от габаритов конструкции и на таком расстоянии  $d$  от пленки, которое было бы меньше, чем начальное ( $d = 30 \div 40$  см) (рис. 5.28, б). При таком решении стержни из одного ряда проектируются на пленку с разной шириной, кроме того, на снимке можно подсчитать количество стержней. Диаметр стержней определяют по формуле (5.37) для самого большого и самого малого диаметра изображения, предполагая, что эти два изображения являются соответственно стержнями самыми удаленными и самыми близкими по отношению к пленке. После того как отснята продольная арматура в границах центральной зоны балки, определяют отогнутую арматуру. Для этого около одной из опор выполняется серия рентгеновских снимков от опоры по направлению к середине пролета в зависимости от количества стержней, которые находятся в сжатой зоне балки (см. рис. 5.29, а) на длине, равной  $l/5 - l/4$ .

Определение существующей арматуры в колонне производится редко. Способ проведения радиографических испытаний аналогичен стандартному методу радиографирования с тем лишь отличием, что толщина бетона, которую необходимо исследовать, оказывается очень большой. По этой причине расстояние источник — пленка должно быть небольшим (рис. 5.30). Необходимо, чтобы размер пленки был на 2 см больше, чем сторона колонны, чтобы получить изображение угловых стержней. Если в колонне имеется средний стержень (см. рис. 5.30), то источник излучения перемещается на ось, проходящую через средний стержень, чтобы избежать наложения изображений стержней, расположенных на противоположных сторонах колонны.

В качестве примера можно привести результат определения арматуры в круглой железобетонной предварительно-напряженной пустотелой стойке. Эти стойки применяют при электрификации железных дорог.

Так как толщина стенки стойки небольшая (около 5 см), применяют помещенный в компактный цилиндр радиоизотоп в качестве источника гамма-излучения. Источник через отверстие диаметром 2—3 см помещают



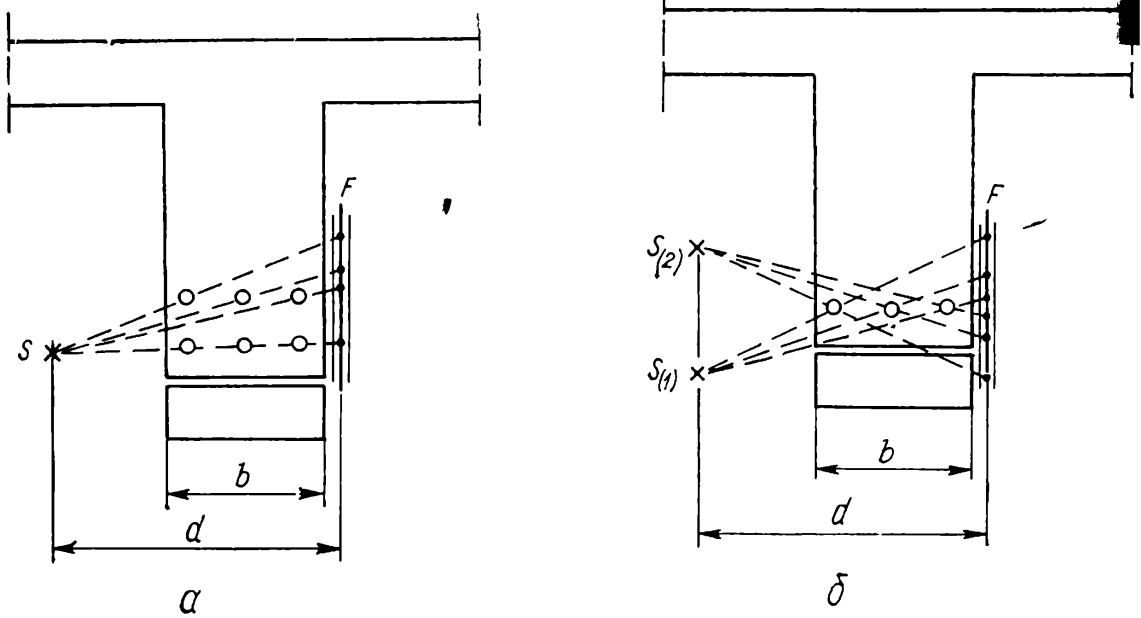


Рис. 5.28. Схема радиографии балки в пролете

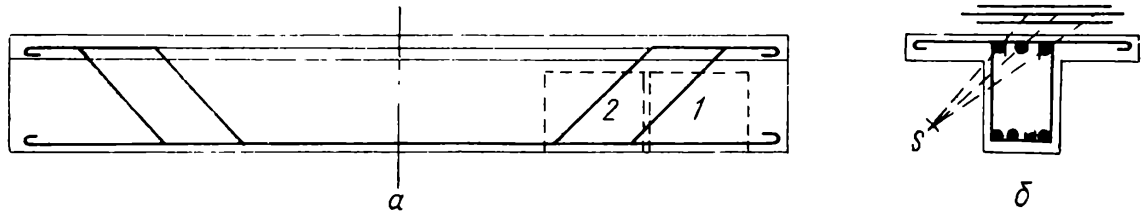


Рис. 5.29. Схема радиографии балки на опоре

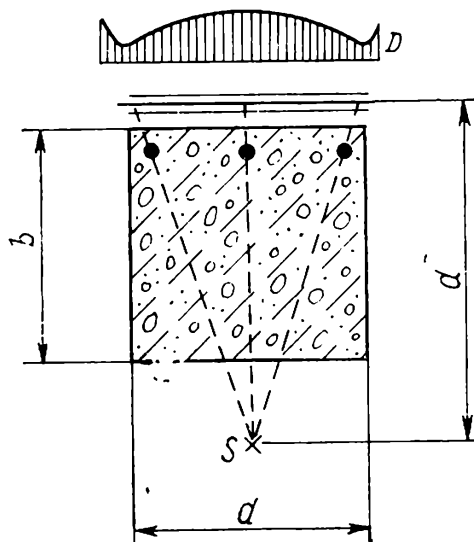


Рис. 5.30. Схема радиографии обычной колонны

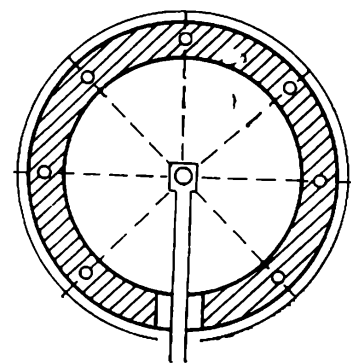


Рис. 5.31. Схема радиографии колонны круглого сечения

в центре колонны (рис. 5.31). Пленку закрепляют снаружи колонны. Короткая экспозиция, ограниченная несколькими минутами, позволяет устанавливать тип колонны (обычная железобетонная или предварительно-напряженная), а также ее арматуру.

**5.2.3.4. Определение арматуры радиометрическим способом.** Определение арматуры в железобетоне радиометрическим способом является очень важным для стран, не изготавливающих пленки. Впрочем, даже в странах, где изготавливается пленка, в настоящее время происходит автоматизация новых методов, что приводит к жесткой конкуренции радиометрического метода с гаммаграфическим. Это связано со снижением затрат времени и материалов (пленок и химикатов). В настоящее время INCERC разработал прибор, подробно изложенный в п. 5.2.3.2, который предназначен для установления арматуры в колонне (см. рис. 5.21).

Принцип установления арматуры в колонне с помощью радиометрии основывается на двух явлениях:

различное поглощение гамма-излучения в бетоне и в стали;

различное поглощение при одинаковом диаметре арматуры, если стержни близко расположены от источника или близко от детектора.

**5.2.3.5. Определение толщины слоя корродированного бетона с помощью радиографии.** Другой областью применения радиографии является определение глубины разрушенного слоя под действием растворов кислот. Известно, что почти все растворы кислот действуют на бетон или растворы. В принципе воздействие заключается в растворении вяжущего. Это воздействие происходит в результате растворения гидроксидов кальция, после чего следует дальнейшее воздействие на целый ряд минералогических компонентов бетона.

Бетон или раствор без вяжущего становится пористым, хрупким, лишенным механической прочности, что облегчает прохождение через него проникающей радиации.

Отсюда вытекает возможность эффективного применения метода на стадии лабораторных исследований, на образцах размером  $2 \times 2 \times 12$  см, принятых для исследования влияния добавок латекса на прочность в условиях коррозии цементного раствора. Исследования были выполнены [25] на воздействие: соляной кислоты, серной кислоты, азотной кислоты в разбавленных растворах 0,5; 1 и 2%. Радиографический метод позволяет осуществить следующее:

1) установить, какие образцы подверглись действию коррозии, их отличие от тех, которые не были подвергнуты действию корродирующих веществ;

2) установить возможность определения толщины слоя, в котором происходил процесс коррозии. На таком изображении можно увидеть, что коррозионный процесс распространяется на глубину 3—4 мм от поверхности образца.

3) установить возможность сравнения различных составов цементного раствора, прочность которого зависит от растворов кислот, с целью сравнения их поведения под действием различных коррозионноактивных веществ;

4) иметь возможность наблюдать скорость коррозии материала в растворах кислот различной концентрации;

5) получить изображения образцов при сравнении материалов, подвергшихся воздействию различных коррозионноактивных веществ с целью установления области их применения.

Внимательное наблюдение за скоростью коррозии в течение длительного времени облегчило использование добавок латекса, которые сохраняют сцепление с заполнителем даже после удаления цемента.

**5.2.3.6. Определение плотности бетона в сооружениях.** Плотность бетона в сооружении, как затвердевшего, так и свежееуложенного, определяется с помощью поглощения энергии ионизирующего излучения (см. п. 5.2.1.3).

**Метод поглощения.** Этот метод позволяет получить значения плотности по всей толщине бетона. Как и во всех радиометрических измерениях, в измерениях плотности бетона основная трудность заключается в строгом соблюдении геометрических соотношений системы измерения. Для определения плотности бетона в колонне INCERC применил приспособление, показанное на рис. 5.21. Для пересчета результатов измерений скорости счета  $N$  (имп/мин) в измерения плотности было принято выражение коэффициента линейного ослабления  $\mu$  из формулы (5.14), а интенсивность  $I$  была заменена пропорциональной величиной — скоростью счета  $N$ :

$$\mu = \frac{\ln \frac{N_0}{N}}{x}, \quad (5.38)$$

где  $N_0$  — скорость счета на воздухе;  $N$  — скорость счета на бетоне толщиной  $x$ .

Отношение между  $\mu$  и  $\rho_d$  представляет собой линейную зависимость и в испытаниях используется (источник кобальт-60, пучок диаметром 8 мм на выходе из контейнера) выражение:

$$\frac{\mu}{\rho_d} = 0,045 \text{ см}^2/\text{г}, \quad (5.39)$$

которое было получено на основе тарировочных измерений, выполненных на кубах из бетона со стороной 20 см (рис. 5.32). Результаты экспериментов на колонне представлены на рис. 5.33, а, б, в для бетона с обычным заполнителем для трех случаев уплотнения: хорошо вибрированного, слабо и не-вибрированного.

Другой тип приспособления, разработанный для исследования наружной стены и сборной плиты, был применен проф. Э. Полем и представлен на рис. 5.34. Он состоит из одной несущей рамы в виде буквы U, которая удерживается на поверхности бетона с помощью нескольких вспомогательных креплений и является несущей. Рама имеет две опоры, расположенные по обе стороны стены, кроме того, на раме имеются две вертикальные опоры (так же по обе стороны), на которые укладываются U-образные держатели источника и детектора.

Для определения плотности свежееуложенного бетона методом поглощения в то время, когда элемент находится в опалубке, наиболее эффективная схема представлена на рис. 5.35. Источник 3 находится на конце глубинного зонда 2, введенного в бетон на определенную глубину, которую можно изменять в зависимости от типа проверяемого элемента, но она не должна превышать 50 см.

В качестве источника излучения рекомендуется кобальт-60 активностью между 0,1—1 мкюри или цезий-137 активностью 0,8—5 мкюри. Детектор 1 состоит из двух счетчиков Гейгера—Мюллера или же из двух сцинтилляционных детекторов, расположенных симметрично на поверхности. Тарировочная кривая для такого зонда приведена на рис. 5.36 [18] для располо-

Рис. 5.32. Зависимость  $\mu$ — $\rho_a$  для бетона при воздействии источника излучений Co-60

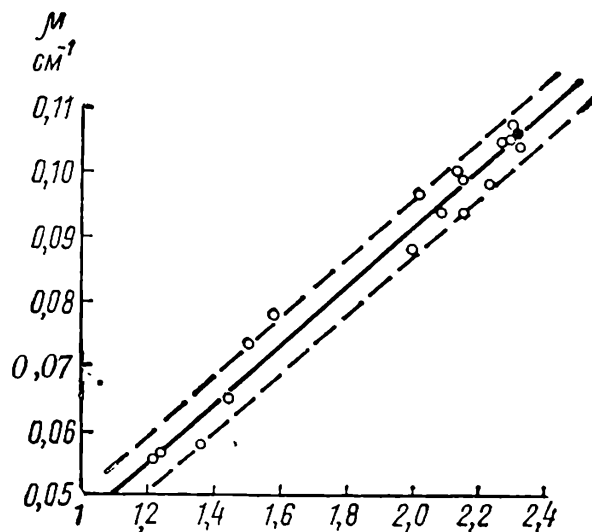
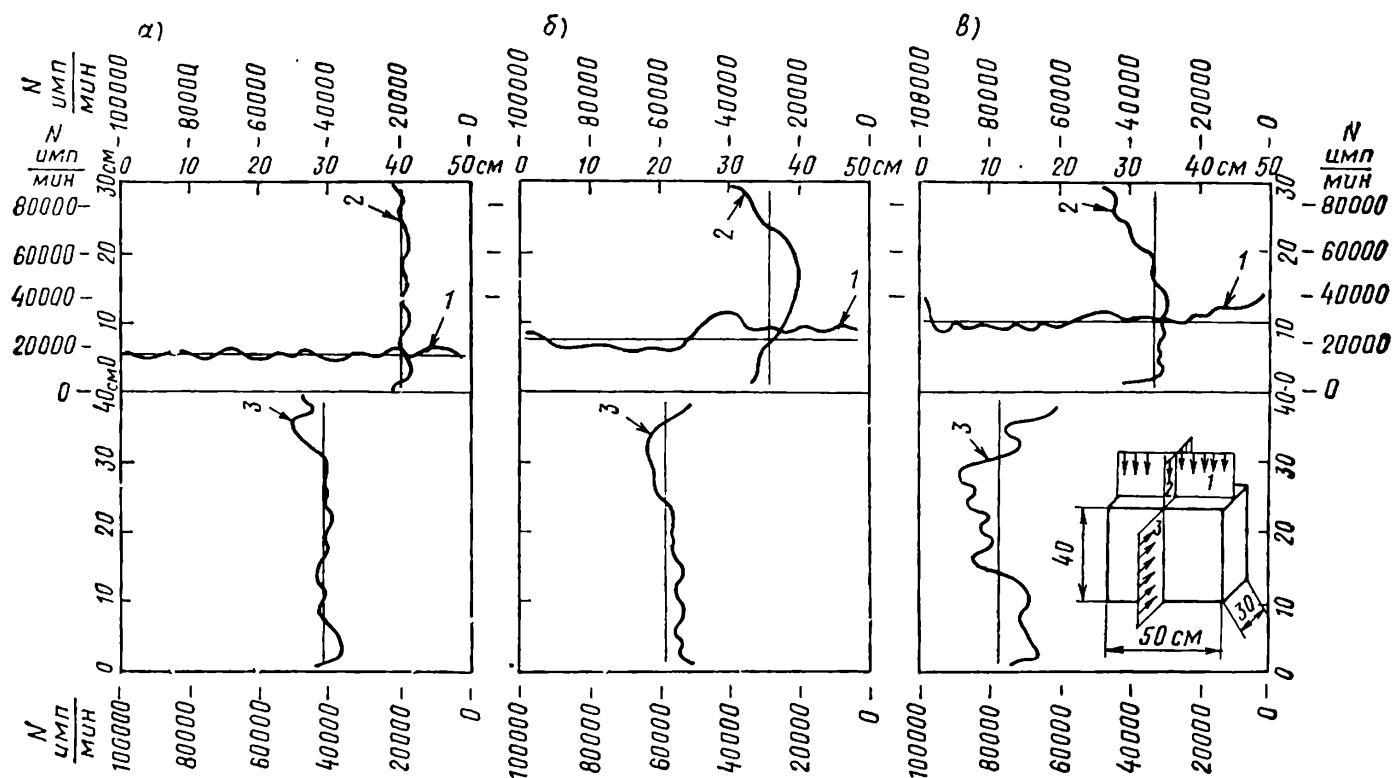


Рис. 5.33. Бетоны с различной степенью вибрирования. Диаграмма скорости счета

$\alpha$  — хорошая (20 с);  $\beta$  — слабая (5 с);  $\gamma$  — не-вибрированный (0 с)



жения детектора от зонда—на расстоянии 40 см и для различных глубин его погружения в бетон (30, 40 и 50 см).

**Метод регенеративного рассеяния.** В определенных случаях доступ к обеим сторонам конструктивного элемента невозможен [26]. В этом случае применяется поверхностный метод, основанный на регенеративном рассеянии излучения (см. п. 5.2.1.4).

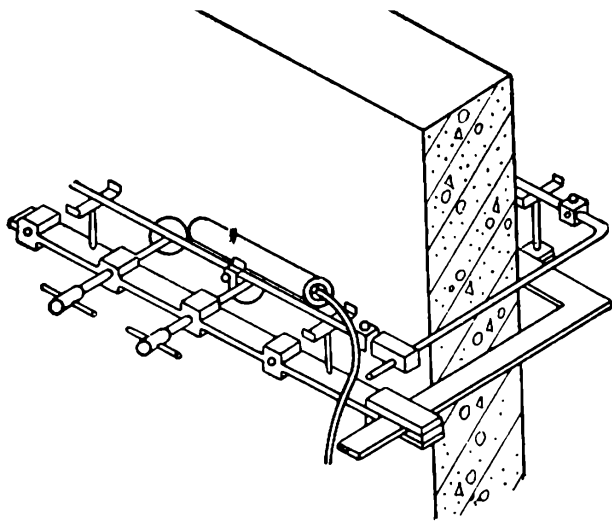


Рис. 5.34. Приспособление для определения плотности бетона в плитах и сборных перегородках

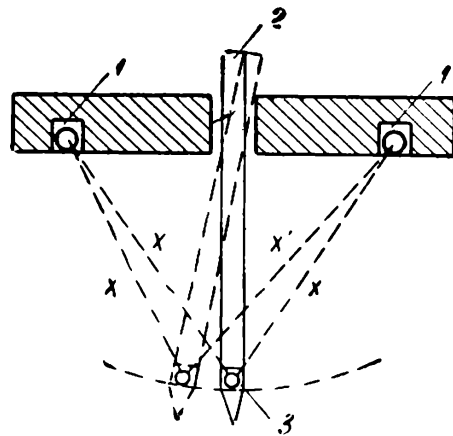


Рис. 5.35. Глубинный зонд для измерения плотности по методу поглощения  $\gamma$ -излучения

Поверхностный зонд (рис. 5.37) применяется для бетона с использованием гамма-излучения кобальта-60 или цезия-137 с активностью ниже 1 мкюри, помещенных в свинцовом контейнере 1 со стенками толщиной 5—6 см [27]. Контейнер позволяет доставлять источник излучения для непосредственного контакта с поверхностью бетона путем перемещения в вертикальном направлении. В состав зонда входит детектор 2, имеющий также свинцовый экран толщиной около 2 см для защиты от направленного излучения и связанный с пересчетным устройством. Приспособление осуществлено со строго постоянными геометрическими размерами и для определенного расстояния между источником и детектором. На рис. 5.38 приведена тарировочная кривая, полученная проф. Э. Полем [4] для направленного из-

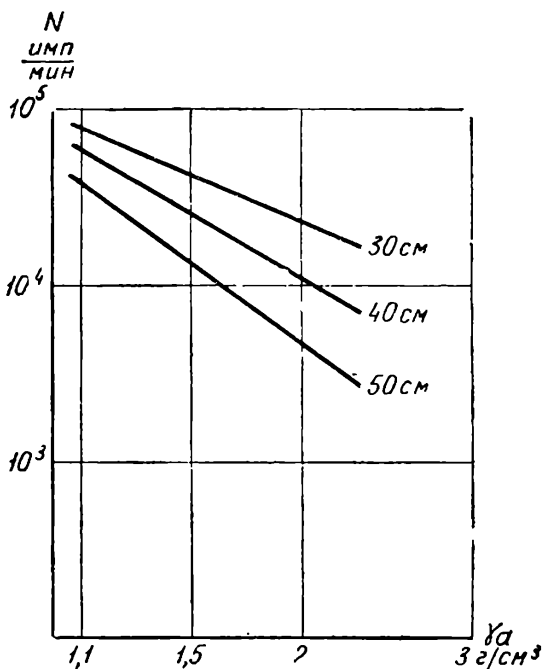


Рис. 5.36. Кривая тарировки глубинного зонда по методу поглощения  $\gamma$ -излучения

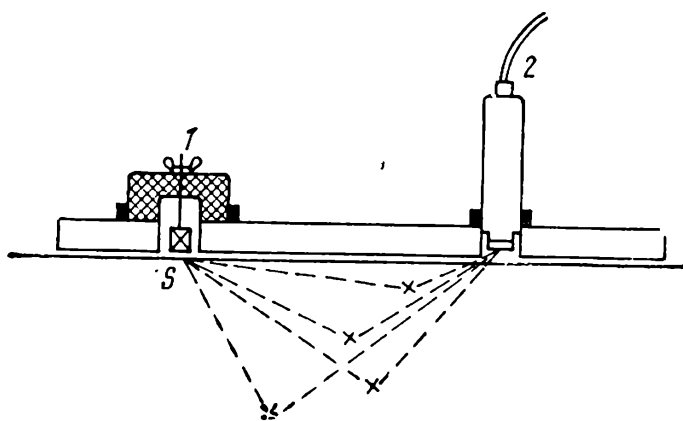


Рис. 5.37. Поверхностный плотномер

лучения сверху вниз и снизу вверх от источника активностью 0,5 мкюри кобальта-60 и 0,9 мкюри цезия-137.

Метод рекомендуется только в том случае, когда глубинный метод не может быть использован.

Здесь же следует отметить, что глубинный зонд с применением регенеративного рассеяния был использован Брокардом [28] с источником кобальт-60 на 5 мкюри и детектированием с помощью счетчика Гейгера — Мюллера, связанного с пересчетным устройством (рис. 5.39).

**5.2.3.7. Контроль качества инъекции в железобетонных предварительно-напряженных элементах.** Важным аспектом надежности в процессе производства железобетонных работ с предварительным напряжением элементов является контроль инъекции раствора в канал, в котором находится пучок предварительно-напряженной арматуры. С помощью этой операции обеспечивается, кроме повышения несущей способности, также и защита пучка предварительно-напряженной арматуры от коррозии [30].

Среди неразрушающих методов радиографический представляет в распоряжение контролера упрощенные приемы оценки качества инъекции [19]. Для применения метода необходимо принять во внимание следующие основные рекомендации:

направление излучения должно быть по возможности горизонтальным. Такое направление благоприятствует детектированию пустот в верхней части арматурного пучка, возникающих благодаря расслоению;

радиография должна быть выполнена в зоне изменения направления пучка или у торца, в особенности у анкера, через который выполняли инъекцию;

источник центрируют по отношению к верхней грани канала.

Параметры экспозиции указаны в разделе 5.2.3.1; фотографическая обработка пленки производится в соответствии с указаниями изготовителя.

В заключение приводится пример дефектной инъекции, определенной с помощью радиографии.

Относительно часто встречающийся дефект приведен на рис. 5.40. На нем мы видим, что канал полностью инъецирован, но в верхней части канала образуется пустота, которая благоприятствует образованию коррозии арматуры. Крайняя зона была впоследствии разрушена и наличие дефекта было установлено визуально.

**5.2.3.8. Определение прочности бетона в швах.** Методы с применением проникающей радиации дают хорошие результаты при определении плотности бетона (см. раздел 5.2.3.6 [34]). Исследования показали, что в случаях, когда прочность бетона зависит исключительно от степени уплотнения, можно определить прямое соотношение между коэффициентом линейного ослабления гамма-излучения и прочностью бетона при сжатии. Такое соотношение показано на рис. 5.41 для бетона с кварцевым речным заполнителем  $\varnothing_{\text{макс}} = 15 \text{ мм}$  и дозировкой цемента PZ400  $350 \text{ кг/м}^3$  в возрасте 28 суток. Образцы отличаются между собой только степенью уплотнения. В этих условиях точность соотношения очень высокая, ошибка не превышает  $\pm 10\%$ . На этом основан метод определения качества раствора в тонком шве в среднем толщиной 2—3 см, расположенном в стыке между сборными элементами (рис. 5.42).

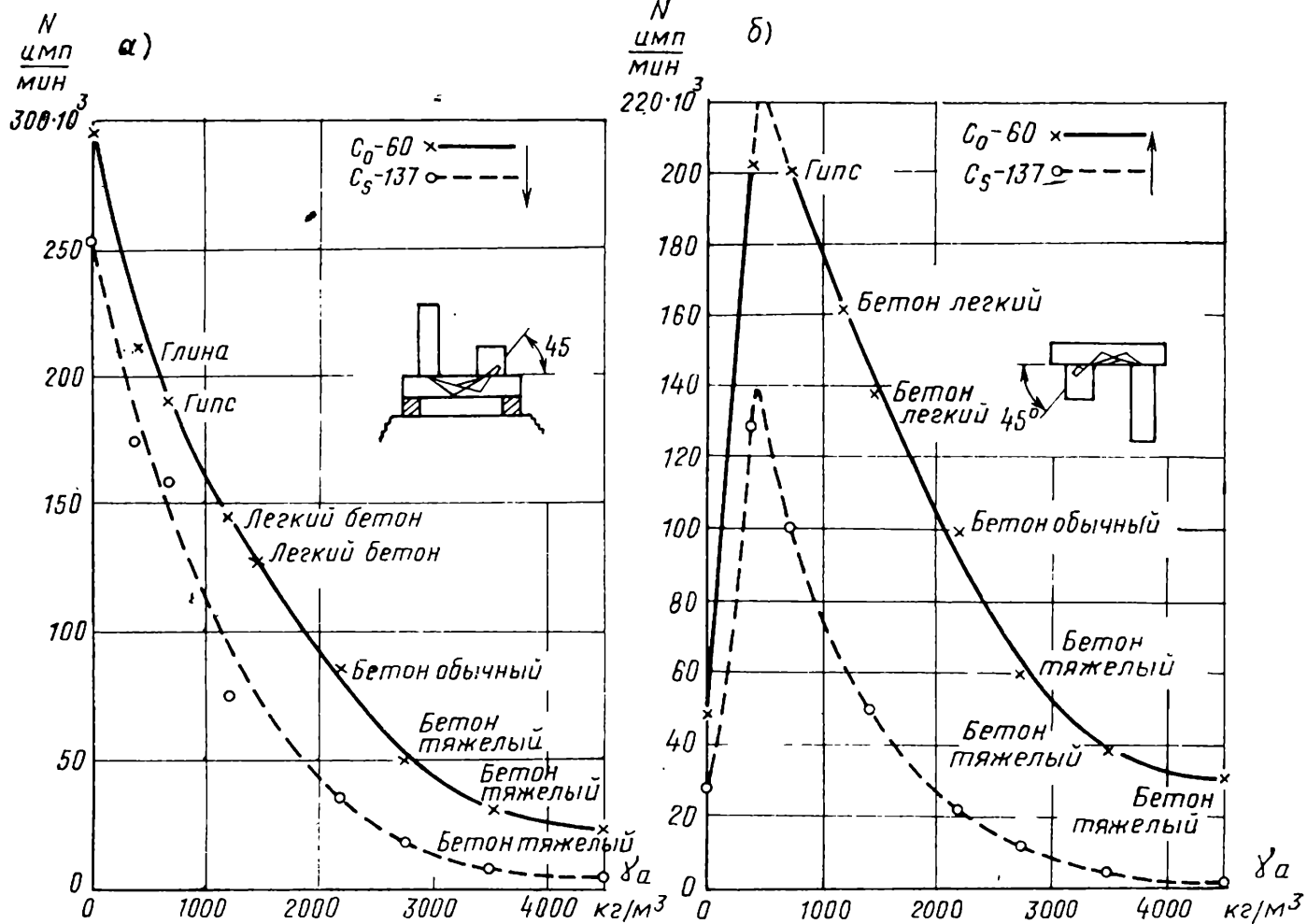


Рис. 5.38. Кривая тарировки  $N-\gamma_a$  в поверхностном методе  
 а — сверху вниз; б — снизу вверх

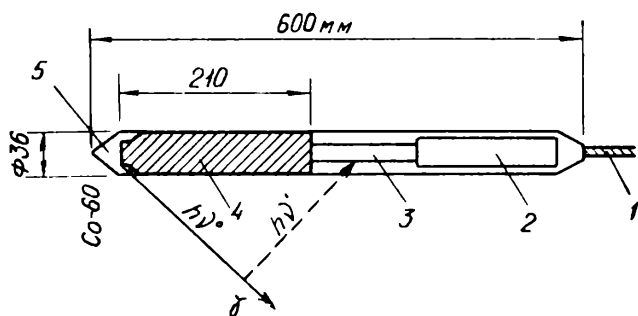


Рис. 5.39. Глубинный зонд для определения плотности с помощью регенеративного рассеяния излучения  
 1 — кабель; 2 — предварительный усилитель; 3 — детектор; 4 — экран свинцовый; 5 — источник

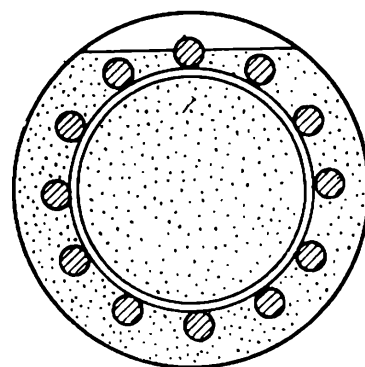


Рис. 5.40. Поперечное сечение канала для инъекции с пучковой предварительно-напряженной арматурой

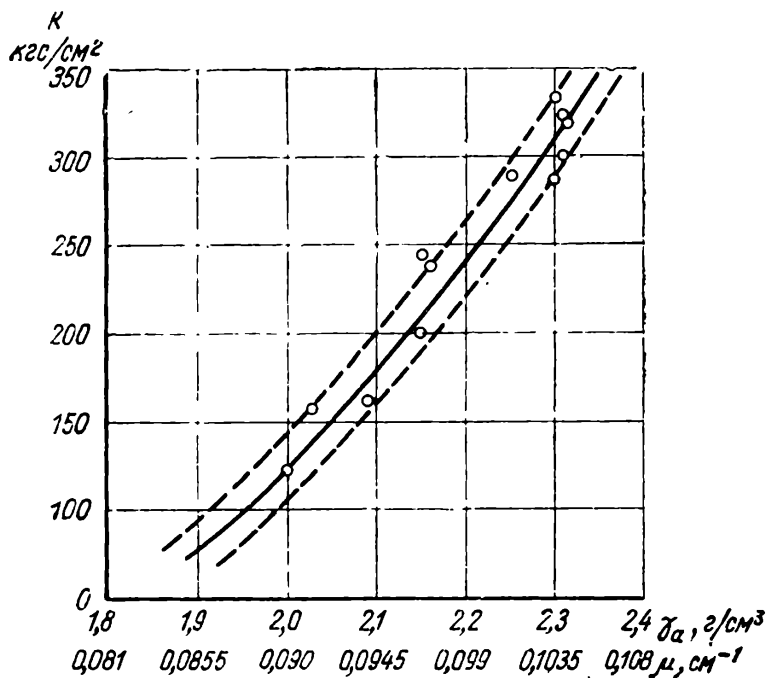


Рис. 5.41. Зависимость  $R-\mu$  и  $R-\gamma_a$  для источника гамма-излучения Co-60

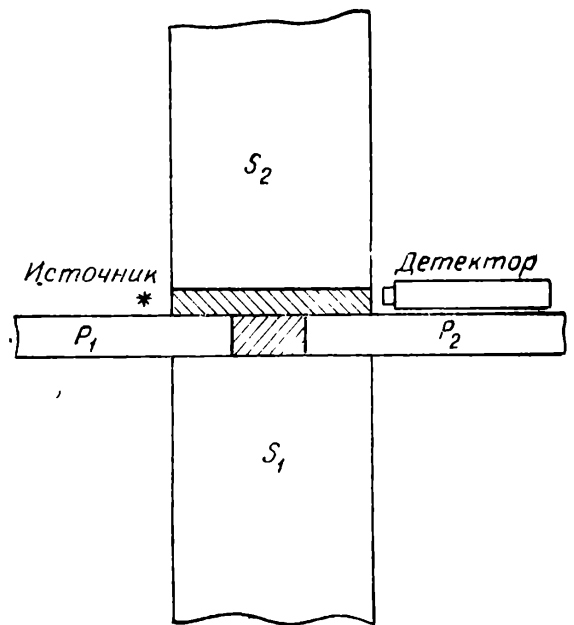


Рис. 5.42. Растворный стык, проверяемый с помощью радиометрии

Необходимо остановиться на том факте, что при изменении состава бетона или раствора и, в особенности, дозировки и вида цемента, происхождения и зернового состава заполнителя, срока испытания тарировочная кривая «коэффициент линейного ослабления—прочность бетона» полностью изменяет положение в координатах  $R_c \mu$  и тарировка должна повторяться.

### 5.3. НЕЙТРОННЫЙ МЕТОД

Нейтронный метод, близко связанный с другими радиоизотопными методами, как метод физического происхождения является, однако, довольно далеким от классических неразрушающих методов, поскольку им предлагается определять свойства, казалось бы, слабо связанные с прочностью материала. Однако известно, что влажность бетона сильно влияет на результаты других неразрушающих методов, как-то на измерения скорости распространения упругих волн или твердости, а также и на более точное определение прочности.

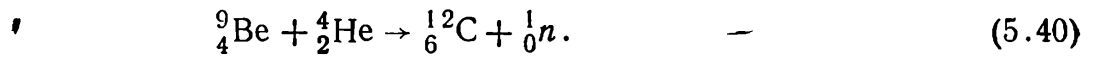
#### 5.3.1. Принцип метода

Нейтронными методами можно определить количество атомов водорода, находящихся в массе материала, введением в него быстрых нейтронов и измерением числа медленных нейтронов, образующихся вследствие взаимодействия быстрых нейтронов с атомами материала. В первую очередь нужно рассмотреть способ получения быстрых нейтронов, затем процесс, на основании которого происходит замедление этих нейтронов и в конечном итоге защитные мероприятия при работе с нейтронным источником.

**5.3.1.1. Источник быстрых нейтронов.** Наиболее мощным источником нейтронов является ядерный реактор, однако транспортирование его на



строительство невозможно. На практике используют менее интенсивные источники, которые основываются на ядерных реакциях типа  $(\alpha, n)$  — бомбардировка ядрами гелия (альфа-частицами) легких элементов, в результате чего образуются свободные нейтроны. Ядерная реакция записывается так:



В табл. 5.5 дается несколько классических источников нейтронов, в которых содержится общий элемент — бериллий.

Таблица 5.5. Источники нейтронов

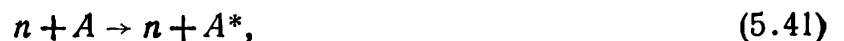
Тип источника	Радий — бериллий	Полоний — бериллий	Плутоний — бериллий	Америций — бериллий
Поток нейтронов в $1/c \cdot \text{кюри}$ . . . . .	$1,7 \cdot 10^7$	$2,5 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
Средняя энергия нейтронов в $Mэв$ . . . . .	5	4	4	3
Энергия $\gamma$ -кванта в $Mэв$ . . . . .	1,8	0,8	0,4	Незначительная
Период полураспада (количество лет)	1560	0,41	24400	460

Из указанных источников для измерения влажности наиболее эффективны америций — бериллий и плутоний — бериллий. Однако эти источники дороги, и на практике часто предпочитают источник полоний — бериллий, который быстро теряет активность из-за небольшого периода полураспада, но более доступен, или же источник радий — бериллий, неудобный из-за высокого фона излучения  $\gamma$ -квантов.

**5.3.1.2. Взаимодействие быстрых нейтронов с веществом.** Поведение нейтронов, которые проникают в вещество, отличается от  $\gamma$ -квантов (фотонов). Последние взаимодействуют главным образом с электронами и в меньшей мере с ядрами атома (см. раздел 5.2.1.2); нейтроны, наоборот, взаимодействуют только с ядрами атомов.

После столкновения нейтрона с ядром возможны следующие виды взаимодействия:

- а) упругое рассеяние ядерного нейтрона;
- б) неупругое рассеяние нейтрона  $n$  ядра  $A$  в результате проникания нейтрона в ядро и передачи части энергии ядра  $A^*$  в виде энергии возбуждения параллельно с повторным излучением нового нейтрона малой энергии. Схема процесса записывается так:



При непрерывном процессе во многих случаях возбужденное ядро возвращается в первоначальное состояние, излучая  $\gamma$ -квант:



- в) изменение структуры ядра  $A$  вследствие ядерной реакции запишется так:



Для бетона характерно упругое рассеяние нейтронов. Потерю энергии  $E_2$  за счет упругого рассеяния можно подсчитать, если известна начальная кинетическая энергия  $E_0$ :

$$E_0 = \frac{1}{2} v_0^2, \quad (5.44)$$

где  $v_0$  — начальная скорость нейтрона с массой, равной 1, вследствие столкновения с ядром массы  $A$  (рис. 5.43). Энергия  $E_2$  может передаваться ядру  $A$  в виде кинетической энергии. Поскольку столкновение может быть внецентренным, скорость  $v_2$  передается ядру  $A$ :

$$v_2 = \frac{2v_0}{A+1} \cos \theta, \quad (5.45)$$

где  $\theta$  — угол между начальным направлением движения нейтрона и окончательным направлением движения нейтрона (см. рис. 5.43).

Потеря энергии нейтроном от одного столкновения выражается так:

$$E_2 = \frac{1}{2} A \left( \frac{2v_0}{A+1} \right)^2 \cos^2 \theta = A \left( \frac{2}{A+1} \right)^2 E_0 \cos^2 \theta. \quad (5.46)$$

Максимальная потеря энергии происходит при  $\cos \theta = 1$ , и, следовательно, создается центральное рассеяние, в этом случае:

$$E_{2 \text{ макс}} = \frac{4A}{(A+1)^2} E_0. \quad (5.47)$$

Углы  $\theta$  могут быть любыми, поскольку рассеяние возможно во все стороны.

Поскольку  $E_2$  может изменяться от 0 до  $E_{2 \text{ макс}}$ , среднее значение  $E_2$  равно:

$$\bar{E}_2 = \frac{2A}{(A+1)^2} E_0. \quad (5.48)$$

Отношение средней поглощенной энергии к начальной  $\eta$  может быть записано в виде

$$\eta = \frac{\bar{E}_2}{E_0} = \frac{2A}{(A+1)^2}. \quad (5.49)$$

Отметим, что  $\eta$  является убывающей функцией массы ядра  $A$ . Если сравним энергию, которую теряет нейтрон при столкновении с атомом водо-

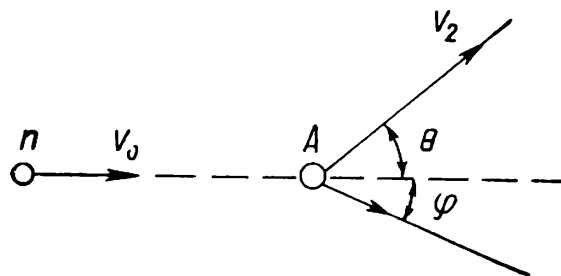


Рис. 5.43. Схема упругого соударения нейтрона с ядром

рода, с потерями от столкновения с атомом углерода или кислорода, значения  $\eta$  принимают вид

$$\eta_n = \frac{1}{2} ; \eta_c \approx \frac{1}{4} ; \eta_o \approx \frac{1}{6}. \quad (5.50)$$

Из (5.50) видно, что потеря энергии нейтроном при последовательном столкновении с другими атомами из химического состава бетона в присутствии водорода ничтожна и что, следовательно, замедление нейтронов происходит в основном благодаря присутствию связанной или несвязанной воды в бетоне, которая является основным соединением, содержащим водород.

**5.3.1.3. Защита от быстрых нейтронов.** Защита против быстрых нейтронов состоит из трех слоев:

слоя замедлителя, роль которого состоит в захвате быстрых нейтронов путем последовательных столкновений. Необходимо, чтобы слой был богат водородом или другими легкими атомами. Часто применяют воду, тяжелую воду, парафин, терфенил, другие органические материалы, бериллий, графит;

слоя захвата, который играет роль поглотителя медленных нейтронов из первого слоя, появившихся в результате ядерных реакций вида  $(n, \gamma)$ , а также  $(n, p)$  или  $(n, \alpha)$ . Элементами, которые обладают этими свойствами, являются бор, кадмий и пр. Для этого слоя, который может быть перемешан с первым слоем, часто применяется силикат бора, поглощающий поток проникающей радиации или ионизированных частиц, который создается взаимодействием нейтронов с ядрами химических элементов из слоя захвата.

От гамма-излучения протонов и  $\alpha$ -частиц экранирует соответствующий защитный слой свинца.

## 5.3.2. Испытательная аппаратура

Испытательная аппаратура состоит из источника быстрых нейтронов, детектора тепловых нейтронов, пересчетного устройства.

Детектирование в настоящее время выполняется в большинстве применяемых приборов пропорциональным счетчиком с трехфтористым бором ( $\text{BF}_3$ ). Ядерная реакция, которая происходит при захвате тепловых нейтронов, записывается так:



Пересчетное устройство выполняется портативным с питанием от сети или от батареи.

Особенно важно для точных измерений создание условий сохранения строго постоянных геометрических соотношений в системе источник — детектор.

**5.3.2.1. Глубинные зонды.** К первой категории относятся глубинные зонды с использованием детекции с пропорциональным счетчиком с  $\text{BF}_3$ . В эту категорию входит зонд, принятый Брокердом [28], изображенный на рис. 5.44. Он состоит из источника Ra-Be 5, закрепленного на конце стального зонда, экрана из кадмия 4, детектора с  $\text{BF}_3$  2, находящегося на опоре 3,

← Рис. 5.44. Глубинный зонд для определения влажности со счетчиком BF<sub>3</sub> Брокарда

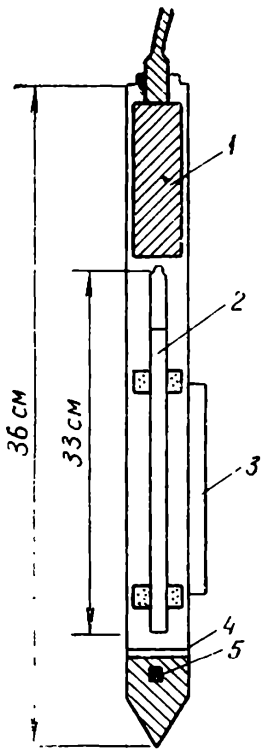
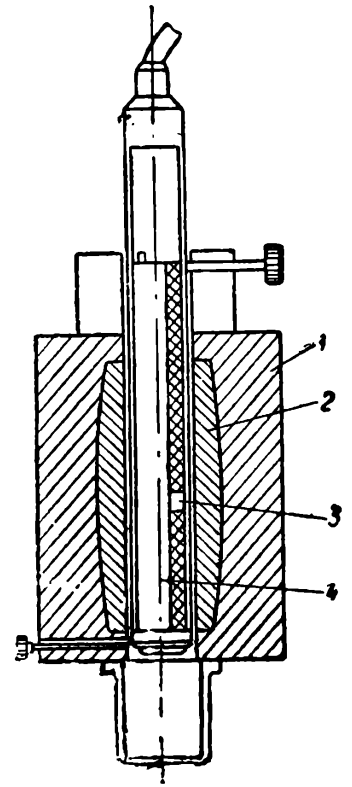


Рис. 5.45. Глубинный зонд для определения влажности со счетчиком BF<sub>3</sub> (N.C.C.)



которая связана с установкой счета с помощью предварительного усилителя 1. Зонд имеет полную длину около 70 см.

Другой вариант глубинного зонда, более компактный и лучше конструктивно выполненный, разработан фирмой Nuclear Chicago Corporation (NCC) в США с источником Ra-Be и детектором с BF<sub>3</sub> [35]; он приведен на рис. 5.45. В американском варианте источник 3 и детектор 4 расположены рядом с учетом того, что влияние направленного излучения источника может создавать помехи. Зонд и главным образом источник защищают путем покрытия массой парафина с бором 1, а внутреннюю часть маленького контейнера экранируют свинцом 2. Для проведения измерений зонд освобождают из нерабочего положения путем ослабления шурупов и проталкивания его вдоль канала.

В других вариантах глубинного зонда применяется в качестве детектора индий-115, радий-103 или аргентум-108 в виде тонкой листовой фольги, проложенной между двумя листами кадмия [36]. Любой из упомянутых детекторов обладает свойством создавать с медленными нейтронами и ядрами радиоактивные соединения, которые затем расщепляются с помощью β- и γ-излучений, переходя в один из устойчивых изотопов. Такая двухступенчатая реакция приводится в качестве примера:



Период полураспада индия-116 от 1/2 до 1 ч, в течение этого времени может измеряться радиоактивность фольги с помощью счетчика, применяемого для β- и γ-излучений, таким образом, получают значение интенсивности

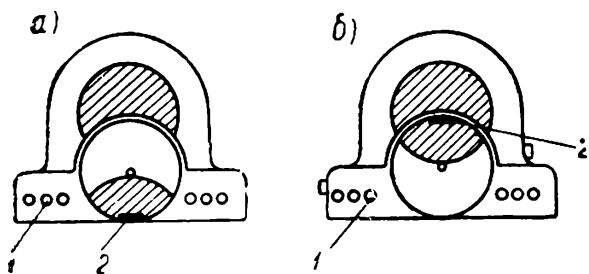


Рис. 5.46. Поверхностный зонд для определения влажности IFA  
*a* — открытое положение; *b* — закрытое положение

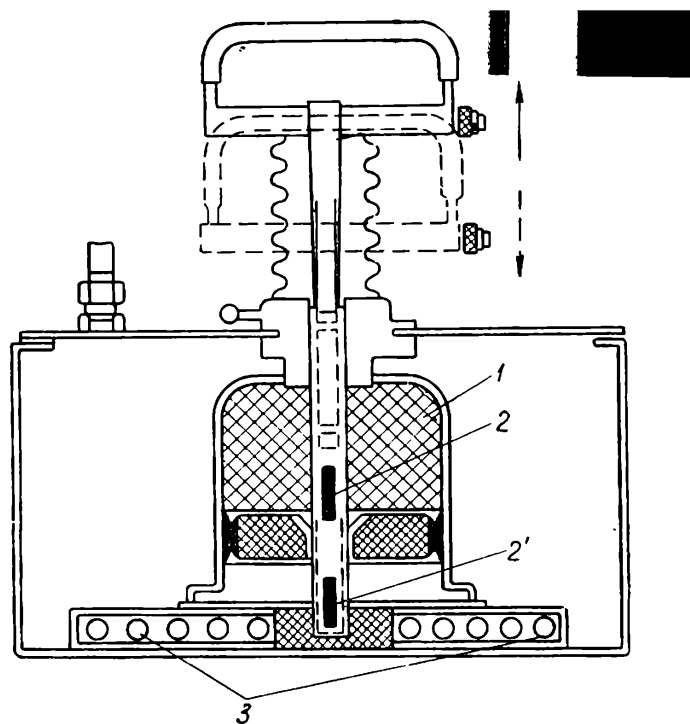


Рис. 5.47. Поверхностный зонд для определения влажности (NCC)

излучения, пропорциональное потоку тепловых нейтронов, которое, в свою очередь, пропорционально количеству атомов водорода.

**5.3.2.2. Поверхностные зонды.** Поверхностный зонд с шестью пропорциональными счетчиками *1*, источником полоний — бериллий *2* типа IFA, разработанный в Румынии, показан на рис. 5.46. Из рисунка видно, что установка источника в рабочее положение осуществляется одним вращением источника [37].

Другой тип поверхностного зонда с источником радий — бериллий *2,2*, десятью пропорциональными счетчиками *3* и парафиновой защитой *1* был осуществлен NCC и изображен на рис. 5.47. Установка источника в положение для проведения измерений осуществляется путем перемещения по вертикали [35].

Сведения, которые дают поверхностные зонды, относятся к слою материала в пределах 10—15 см от поверхности.

### 5.3.3. Применение нейтронного метода

**5.3.3.1. Определение влажности бетона или заполнителя.** Важно знать влажность песка при корректировке количества воды в бетонной смеси, добавляемой в бетономешалку. Большое значение имеет контроль влажности свежеприготовленного бетона.

С этой целью применяются главным образом нейтронные поверхностные или глубинные зонды, описание которых приведено в п. 5.3.2. Построение тарировочной кривой является наиболее важным в обоих случаях. Для тарировочных измерений необходимо использовать значительный объем материала с определенной и равномерно распределенной влажностью.

С этой целью приготавливается в различных пропорциях сухая смесь кварцевого песка и квасцов (дигидросульфат), которая содержит определенное количество связанной воды.

Рис. 5.48. Кривая тарировки зонда IFA

△ — песок крупностью 0—7 мм; ● — песок крупностью 0—1 мм; ▲ — бетон; ○ — гравий; □ — каменная крошка

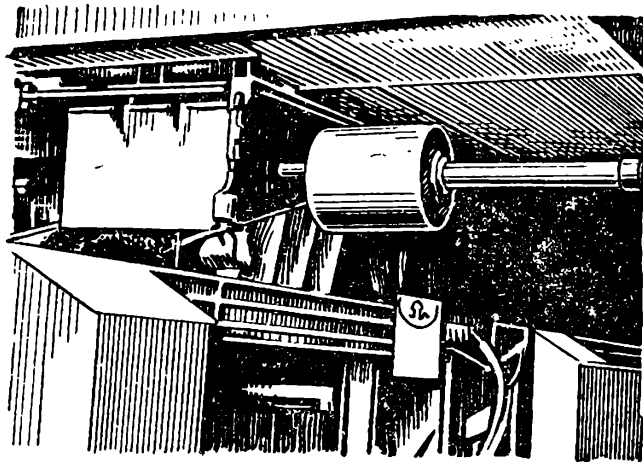
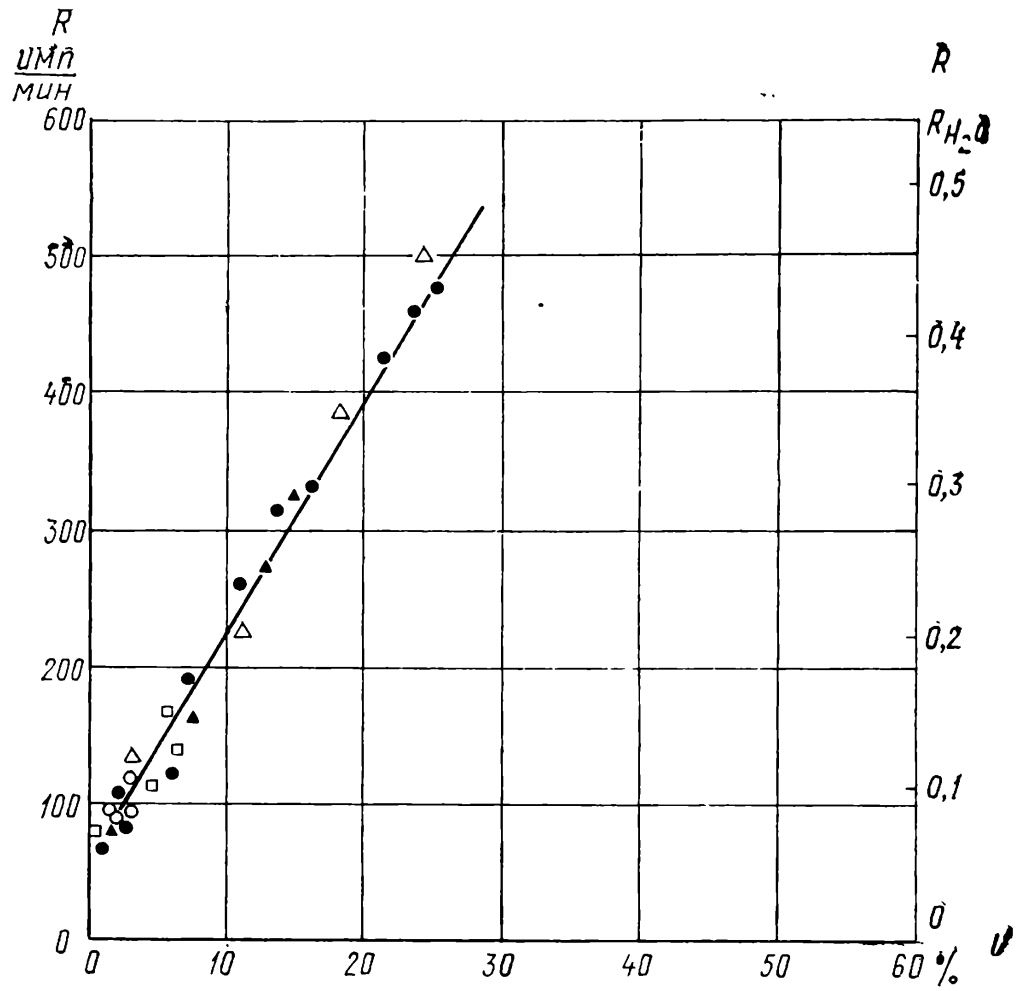
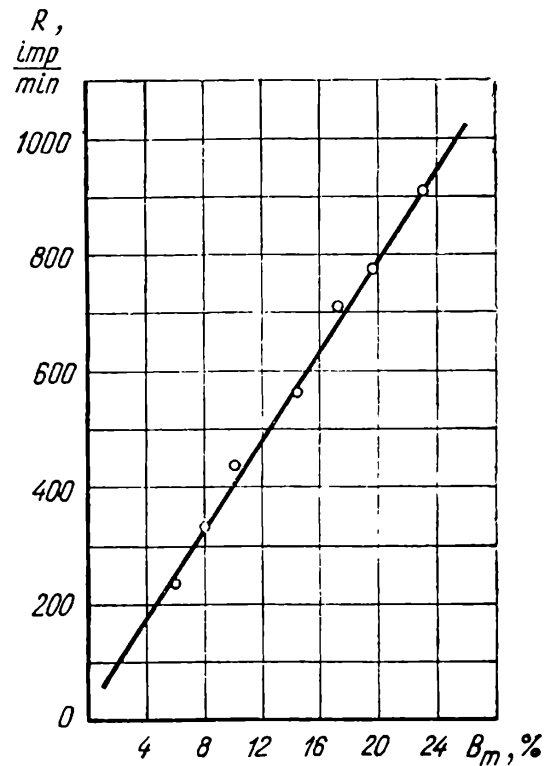


Рис. 5.49. Глубинный зонд, введенный в отверстие бункера для песка, для определения его влажности

Рис. 5.50. Кривая зависимости скорости счета от содержания битума



Объем пробы, установленный при минимальном расстоянии от зонда  $r_u$ , определяется из выражения

$$r_u = r_{H_2O} \sqrt[3]{\frac{100}{u}}, \quad (5.54)$$

где влажность  $u$  принимается в %;  $r_{H_2O}$  — минимальное расстояние в воде, равное 17 см для глубинного зонда и 11,5 см для поверхностного зонда.

Из выражения (5.54) следует, что для влажности 1—2% необходимо использовать сосуд диаметром около 120 см для применения глубинного зонда и 80 см для поверхностного зонда. На рис. 5.48 приведена тарировочная кривая для поверхностного зонда, полученная для песка, гравия (щебня) и бетона [35, 37].

Большие объемы проб для проведения измерений, требуемые условием (5.54), ограничивают применение нейтронного метода при определении влажности бетона и заполнителя. Использование для измерений меньших толщин, чем рекомендуется формулой (5.54), возможно при условии, если сохраняются постоянные объемы пробы и если осуществляется дублирование тарировочной кривой. Для иллюстрации этой идеи Чермаком был создан прибор [38, 39], работающий в бункере для песка. Его применяли для приготовления бетона. Общий вид прибора приведен на рис. 5.49. Глубинный зонд состоит из источника нейтронов и детектора с  $VF_3$ , который был введен в выпускное отверстие бункера. Это устройство способно непрерывно давать сведения о влажности находящегося в бункере песка, благодаря измерениям, которые продолжаются в течение 2 мин, с точностью не менее 0,4%. Электрическая сигнализация, которой снабжен глубинный зонд, связана с автоматическим регулятором и применяется для регулирования дозировки воды в бетономешалку.

**5.3.3.2. Определение дозировки битума в асфальтобетон.** При классическом способе определения дозировки битума в асфальтобетон предполагается отбор образца с определенного участка и проведение длительных лабораторных испытаний. Метод, основанный на замедлении быстрых нейтронов, имеет преимущество, так как можно на месте получить результаты с большого количества точек при разгрузке самосвалов (ширина кучи минимум 40—50 см) во время измерений, которые могут сократиться до 10 мин. Как следствие применения нейтронного метода приводятся иллюстрации, полученные при использовании поверхностного зонда типа IFA [40] для определения дозировки битума в асфальтобетон на строительстве шоссе в области Банат. Тарировочная кривая была определена с помощью параллельных измерений методом замедления быстрых нейтронов и с помощью классического процесса Soxhlet на пробе с различным процентом битума.

На рис. 5.50 приведены полученные результаты. На диаграмме отражена линейная зависимость между процентным содержанием битума по весу  $B_m$  и скоростью счета  $R$ . Дозировку битума  $B_v$  на  $1 м^3$ , можно вычислить из уравнения

$$B_v = B_m \rho_b, \quad (5.55)$$

где  $\rho_b$  — плотность бетона в  $кг/м^3$ , которая может быть получена радиометрическим методом. Точность метода  $\pm 6—9\%$ .

## 6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ

Электромагнитные неразрушающие методы могут быть применены для определения арматуры в бетоне, а также влажности в самой конструкции, что является важным при определении прочности бетона комплексом неразрушающих методов.

В перспективе также имеется возможность определения дозировки цемента в затвердевшем бетоне, изготовленном на строительной площадке; это производится комплексом неразрушающих методов, в которых основную роль играет электромагнитный метод.

### 6.1. МЕТОД ПОГЛОЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

#### 6.1.1. Принцип метода

Диэлектрическая постоянная материала может быть определена по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'', \quad (6.1)$$

где  $\varepsilon'$  — фактическая диэлектрическая постоянная материала;  $\varepsilon''$  — коэффициент потерь материала.

Основные трудности, связанные с определением влажности бетона электромагнитным методом, заключаются в том, что электрические свойства его зависят не только от содержания в нем воды, но и от количества и природы растворенных в этой воде солей [1]. Данные, приведенные в табл. 6.1, показывают фактические величины диэлектрической постоянной при  $f = 10\,000$  мГц.

Таблица 6.1. Фактические относительные диэлектрические постоянные ( $f = 10\,000$  мГц)

Материал	$\varepsilon_r$	Материал	$\varepsilon_r$
Воздух . . . . .	1,0005	Парафин . . . . .	1,9—2,3
Дистиллированная вода . . . . .	80—81	Фарфор . . . . .	5,5—8
Бакелит . . . . .	4,5—5,5	Бетон сухой . . . . .	6—7
Каучук . . . . .	2,6—3	Цемент » . . . . .	6—7
Сухая глина . . . . .	2,5—4,5	Расгвор . . . . .	6—7
Слюда . . . . .	4,5—7,5	Стекло . . . . .	5—10
Бумага сухая . . . . .	1,2—2,5	Полистирол . . . . .	2,3



В табл. 6.2 приводится тангенс угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ), определяемый отношением

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (6.2)$$

для бетона, погруженного в дистиллированную воду, и в воду, содержащую 10 г/л NaCl [2].

Таблица 6.2. Коэффициент потерь  $\operatorname{tg} \delta$  в бетоне ( $f = 100$  кГц)

Влажность в %	Вода дистиллированная	Раствор NaCl, 10 г/л
1	0,008	0,019
10	0,195	0,468
20	0,29	0,7

На рис. 6.1 приведены в логарифмической шкале изменения удельной проводимости  $\sigma_v$  в дистиллированной воде, речной воде и морской воде в зависимости от частоты переменного тока, применяемого для измерений [3]. График подтверждает большую разницу, которая наблюдается при небольшой частоте между удельной проводимостью в зависимости от содержания солей в воде, а также тенденцию к получению при частотах, превышающих 2000—3000 мГц, результатов, не зависящих от природы и концентрации солей, содержащихся в растворе.

Для понимания механизма явления диэлектрических потерь и зависимости их от частоты (напряженности) поля следует вспомнить несколько элементарных понятий в отношении адсорбции диполей Дебая [4]. Молекула представляет собой диполь тогда, когда центр тяжести положительного заряда молекулы  $+q$  не совпадает с центром тяжести одинакового отрицательного заряда  $-q$  и происходит раздвижка разноименных зарядов на расстояние  $l$  (рис. 6.2). Диэлектрик, составленный из такой молекулы,

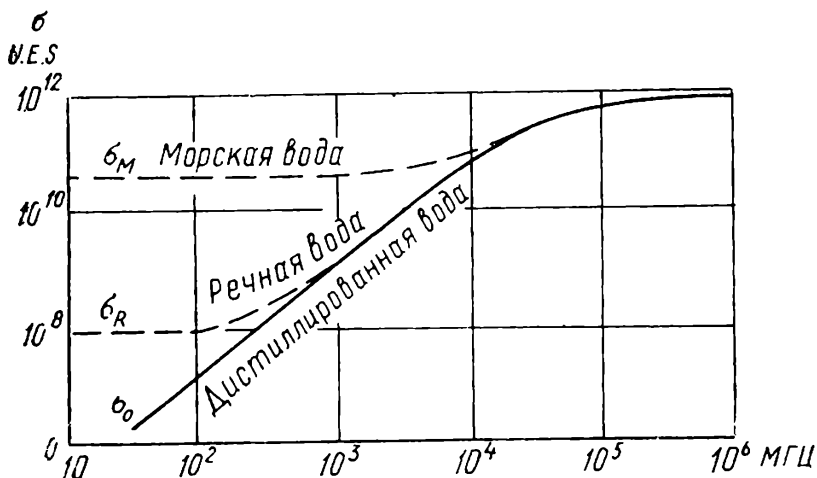


Рис. 6.1. Изменение проводимости воды в зависимости от частоты тока ( $T = 20^\circ \text{C}$ )

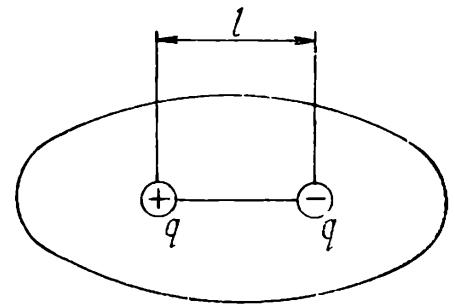


Рис. 6.2. Полярная молекула

называется полярным. Сочетание двух зарядов называется диполем, и характеристикой его является электрический момент, определяемый выражением

$$\bar{p} = q\bar{l}, \quad (6.3)$$

где  $q$ —электрический заряд;  $\bar{l}$ —расстояние между одинаковыми зарядами, которые образуют диполь.

Электрический момент  $\bar{p}$  является вектором, как это следует из формулы (6.3), направленным вдоль  $\bar{l}$  и ориентированным от (—) на (+).

При отсутствии электрического поля молекулы-диполи были расположены хаотически благодаря тепловым колебаниям молекул (рис. 6.3, а); подвергаясь воздействию электрического поля, диполи ориентируются своими положительными зарядами по направлению поля (рис. 6.3, б). Суммарная напряженность поля зависит от взаимодействия внешнего электрического поля и соответствующей энергии, выделяемой тепловым колебанием молекул.

Если поле периодически изменяется на низкой частоте, диполи без фазового сдвига поглощают часть энергии внешнего поля. По мере того как частота увеличивается, диполи все более в своем движении отстают (т. е. увеличивается сдвиг фаз), поглощаемая энергия снижается до тех пор, пока не возникнет такое положение, когда диполи прекратят свое движение и поглощаемая мощность окажется равной нулю.

Измерения поглощения  $\alpha$  электромагнитных волн в воде в зависимости от температуры в интервале 0—40° С при частоте 10 000 мгц показали (рис. 6.4), что с увеличением температуры поглощение уменьшается [5].

Измерение влажности электромагнитным методом следует проводить при определенных температурах, поскольку поглощение электромагнитных волн зависит от температуры. За уровень приведения следует принимать 20° С.

Затухание электромагнитных волн изменяется в зависимости от частоты. Область частот, которая важна для бетона, находится в пределах между

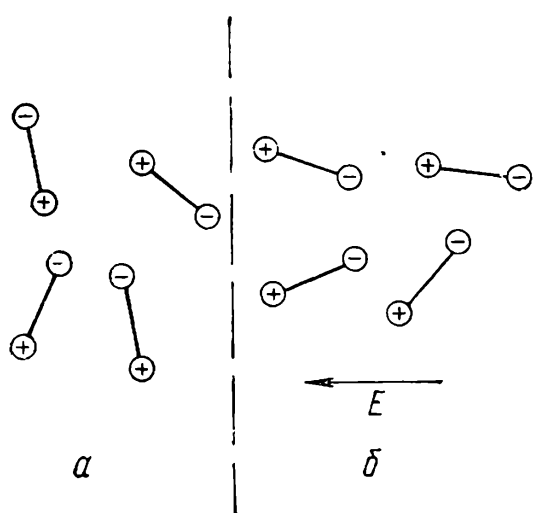


Рис. 6.3. Поляризация диполей  
а — в отсутствие поля; б — в присутствии поля

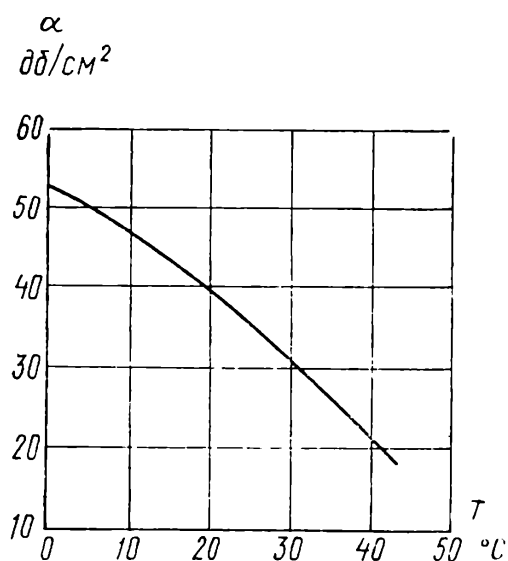


Рис. 6.4. Поглощение слоем воды толщиной 1 см при частоте 10 000 Мгц в зависимости от температуры

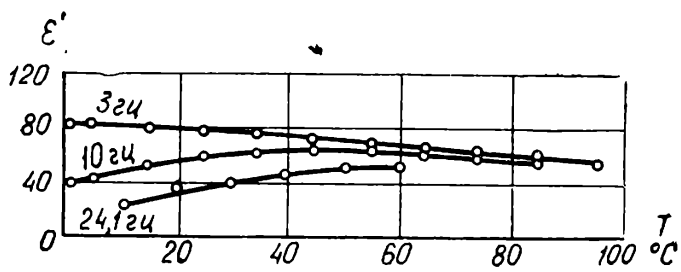


Рис. 6.5. Изменение фактической диэлектрической постоянной  $\epsilon'$  в зависимости от температуры (частоты  $\times 10^6$ )

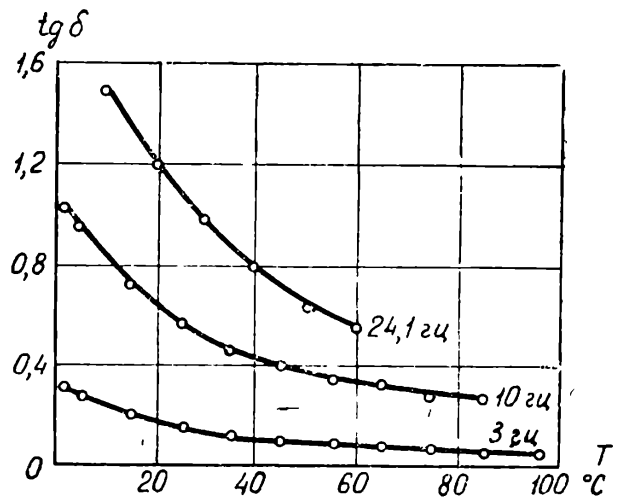


Рис. 6.6. Изменение тангенса угла потерь в воде в зависимости от температуры (частоты  $\times 10^6$ )

1000 и 10 000 мГц [6]. В табл. 6.3 приведено затухание электромагнитных волн на частотах 1000—10 000 мГц в слое воды толщиной 1 см.

Таблица 6.3. Затухание электромагнитных волн

Частота в мГц	Затухание в дБ
1000	1
3000	4
10 000	40

Если предположить, что вода равномерно распределена в бетоне влажностью 10% (максимальная влажность плотного бетона), то из этого следует, что при частоте 10 000 мГц с применением приборов для возбуждения и приема электромагнитных волн чувствительностью до 60 дБ нельзя контролировать толщину более чем 6 см, в то время как при частотах 3000 мГц с применением тех же приборов становится возможным производить измерения толщин бетона до 60 см. Принимая во внимание, что практически влажность бетона не превышает 5—6%, можем сделать вывод, что оптимальная область частот для бетонов в конструкции заключается между 3000—6000 мГц.

Зависимость фактической диэлектрической проницаемости воды  $\epsilon'$  и тангенса угла потерь в воде  $\text{tg } \delta$  от частоты и температуры приводится на рис. 6.5 и 6.6 [7, 8].

Вода, которую обнаруживают в бетоне с помощью поглощения электромагнитных волн, может быть в следующих состояниях:

1) вода кристаллизационная и вода химически связанная, отличающиеся по своим свойствам от обыкновенной воды, и поэтому их обнаружение электромагнитным методом невозможно;

2) вода адсорбированная или физически связанная. Наиболее сильно связанная вода из этой категории находится в мономолекулярном слое. Физические свойства такой воды и, в частности, электрические очень отличаются от обыкновенной. Например, фактическая диэлектрическая прони-

цаемость  $\epsilon_r = 2,2$ , т. е. приблизительно в 40 раз меньше, чем для обыкновенной воды. Абсорбция электромагнитных волн этой водой незначительна, поскольку соответствующие диполи слишком прочно связаны, чтобы быть ориентированными.

Чтобы получить данные о физически и химически связанной воде, существует единственно возможный метод, основанный на использовании медленных нейтронов.

Степень связи физически адсорбированной воды уменьшается по мере нахождения ее в мономолекулярном слое со свойствами, постепенно приближающимися к несвязанной воде. Толщина полимолекулярного адсорбированного слоя не превышает нескольких сотых диаметра молекулы воды;

3) вода несвязанная (свободная, т. е. такая, которая перемещается в бетоне под действием гравитационных или капиллярных сил). Это та вода, которую можно определить методом поглощения электромагнитных волн, при котором диполи свободны и могут быть ориентированы под действием внешнего электрического поля.

### 6.1.2. Аппаратура для исследований

Аппаратура для исследований, разработанная А. Ватсоном [3,7], состоит из одного излучателя и радиолокационного приемника, между которыми помещается испытываемый образец. Передатчик размещается согласно блок-схеме, приведенной на рис. 6.7. Он может питаться от сети переменного тока 220 или 110 в и частотой 50 или 60 гц, а также от батареи постоянного тока напряжением 12 в. Следующий блок состоит из реле переключения сети для возможного изменения полярности. Напряжение 6 в, необходимое для нагревания нитей накала генераторного клистрона небольшой мощности, обеспечивается стабилизатором постоянного тока. Стабилизатор напряжения снабжает питанием частотный модулятор (генератор прямоугольных импульсов) с частотой 3200 гц, мощностью 10 вт, который моду-

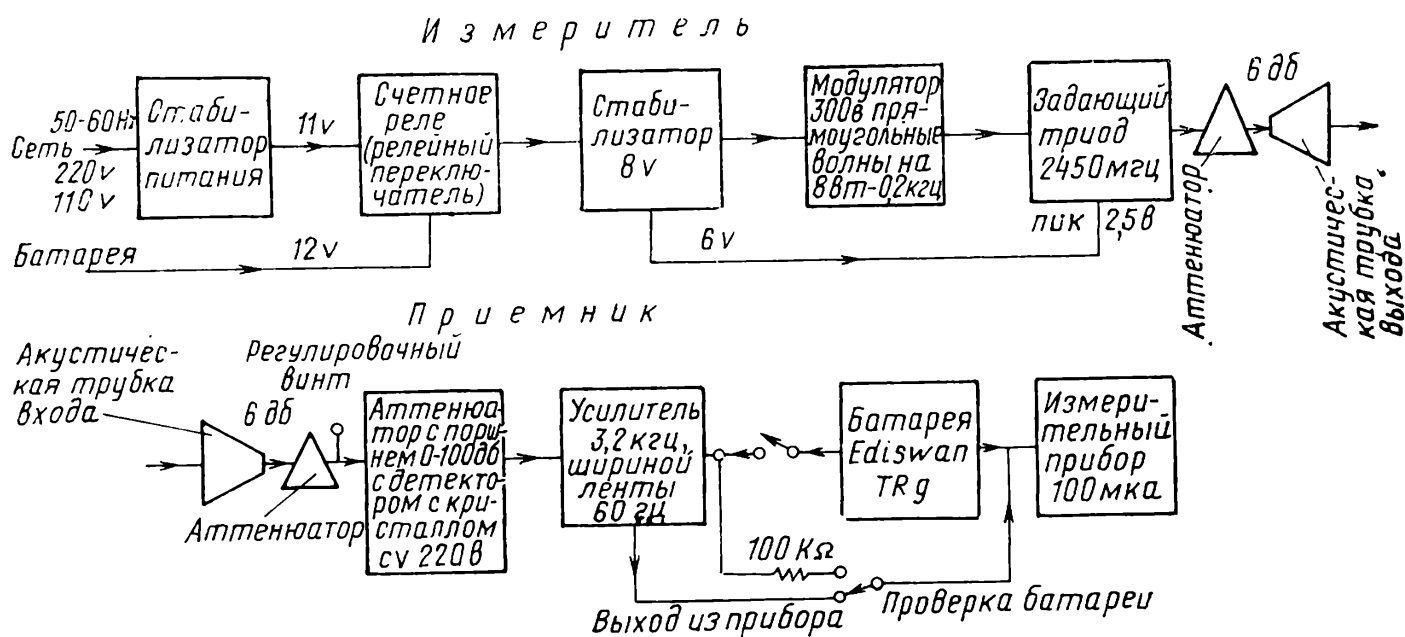


Рис. 6.7. Блок-схема аппаратуры для измерения поглощения электромагнитных волн

лирует электромагнитные волны, генерируемые осциллятором. Эти излучаемые волны передаются из трубчатого рупора, обеспечивающего определенный эффект направленности. Размеры рупора на выходе  $9 \times 12$  см. В передатчике электронные лампы полностью заменены транзисторами, за исключением генераторного клистрона.

Приемник состоит из входного рупора, как и на выходе, являющегося концентратором принимаемых волн, одного аттенюатора на 6 дБ, который играет роль согласующего буфера между прибором и образцом, регулировочного винта для поршневого аттенюатора, позволяющего изменять поглощение в интервале до 100 дБ. В приемнике применен кристаллический детектор. Затем идет усилитель, согласованный с модулированной частотой входного сигнала порядка 1 мкв. В аппаратуру также входят батарея питания приемника и измерительный микроамперметр, который является нулевым измерительным прибором. Масса приемника около 5 кг.

### 6.1.3. Техника измерений

Для измерения влажности бетона в сооружении прodelьвают следующие операции:

обеспечивается питание и работа передатчика и приемника в условиях устойчивого теплового режима;

передатчик и приемник располагаются друг против друга, разделенные воздушной прослойкой, одинаковой с толщиной бетона, в котором производится определение влажности;

регулируется положение поршневого аттенюатора приемника, а также стрелки микроамперметра приемника, чтобы зафиксировать отсчет около середины шкалы, и считывается начальная величина затухания  $n_1$  (в дБ);

передатчик и приемник устанавливаются на бетон, обеспечивается соответствующее центрирование системы; стрелка микроамперметра отклоняется от начального положения, показывая увеличение затухания;

регулируется положение поршневого аттенюатора приемника, а также стрелки показывающего прибора, чтобы снова вернуть ее в начальное положение; считывается затухание  $n_2$  (в дБ);

определяется поглощение электромагнитных волн в бетоне (в дБ):

$$\alpha = n_1 - n_2; \quad (6.4)$$

производится пересчет измеренной величины  $\alpha$  в граммы воды на квадратный сантиметр площади элемента  $G_a$  с помощью тарировочного графика, полученного ранее при параллельных измерениях, проведенных двумя методами. При тарировке влажность бетона определяется помимо электромагнитного волнового метода классическим весовым способом;

производится преобразование количества воды  $G_a$ , полученного в граммах на  $1 \text{ см}^2$ , в объемную влажность  $U_m$  бетона:

$$U_m = \frac{G_a \cdot 100}{\delta \gamma_b} [\%], \quad (6.5)$$

где  $\delta$  — толщина испытываемого бетонного элемента в см;  $\gamma_b$  — объемная масса испытываемого бетона в  $\text{гс/см}^3$  или  $\text{т/м}^3$ .

Процесс повторяется в каждой точке, в которой определяют влажность бетона.

Аппаратура, основанная на поглощении электромагнитных волн на частоте 2450 мГц, разработана научно-исследовательской станцией по строительству в Англии и применена для измерений влажности каменной кладки [3]\*.

При испытании небольших образцов необходимо, чтобы генерируемые волны от передатчика не огибали образец, а доходили до приемника через бетон. С этой целью образец обкладывают материалом с большим поглощением, например полистиролом. Создание вокруг образца металлического кольца — решение явно нецелесообразное.

Если в бетоне заложена арматурная сетка, достаточно редкая, рекомендуется точки для испытания принимать в середине арматурных ячеек. Если арматура преимущественно ориентирована в продольном направлении (колонны, балки), то приборы радиоволнового метода выгодно устанавливать так, чтобы электрическое поле было направлено параллельно направлению арматуры. В этом случае затухание электромагнитных волн является минимальным. В п. 6.1.4.2 излагаются экспериментальные данные, относящиеся к влиянию арматуры.

Необходимо напомнить, что должна регистрироваться температура, при которой выполнены измерения, и в том случае, если разница по отношению к 20° С больше, чем  $\pm 2^\circ \text{С}$  (при частоте 10 000 мГц), применяется следующая формула:

$$\alpha_{\text{прив}} = \alpha_t + 0,8 (t - 20) \frac{\alpha_t}{40}, \quad (6.6)$$

где  $\alpha_{\text{прив}}$  — означает величину затухания в дБ при 20° С;  $\alpha_t$  — затухание в дБ, измеренное при данной температуре;  $t$  — температура при измерении влажности в ° С.

Выражение (6.6) применяют в интервале от 10 до 40° С.

#### 6.1.4. Применение метода поглощения электромагнитных волн

##### 6.1.4.1. Определение влажности затвердевшего бетона в конструкции.

Для определения влажности бетона пользуются тарировочной кривой. С этой целью применяют набор бетонных пластинок относительно небольшой толщины — порядка 3—5 см и с достаточно большой поверхностью для того, чтобы исключить влияние краевых условий (порядка 30 × 30 см).

Эти пластинки укладывают в сушильный шкаф и высушивают при температуре 90—100° С в течение 1—2 суток для того, чтобы полностью удалить несвязанную воду. Высушенную пластинку взвешивают и погружают в воду до полного насыщения. После извлечения из воды пластинки снова взвешивают для определения количества поглощенной воды и измерения поглоще-

---

\* Возможности метода поглощения электромагнитных волн (радиоволнового, СВЧ-метода) по определению влажности бетонной смеси и затвердевшего бетона давно привлекают внимание исследователей и в некоторых случаях уже реализованы для автоматизации технологических процессов приготовления бетона. См. А т а е в С. С. и др. Об автоматизации контроля уплотнения бетонной смеси. «Бетон и железобетон», 1972, № 12.

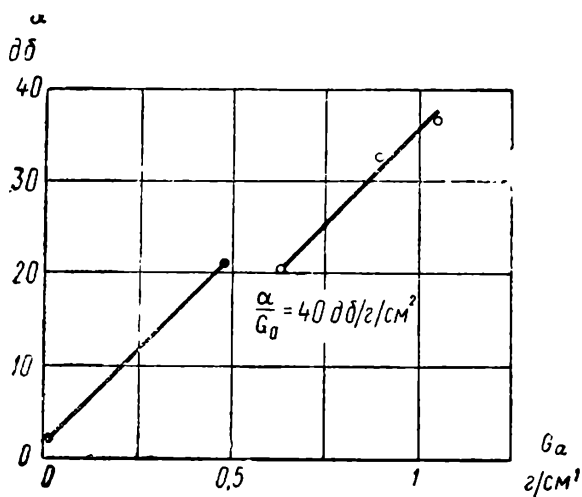


Рис. 6.8. Тарировочная кривая для бетона ( $\delta=13$  см),  $f=10\ 000$  мГц  
 ○ — испытания 31/X 1960 г.; ● — испытания 2/XI 1960 г.

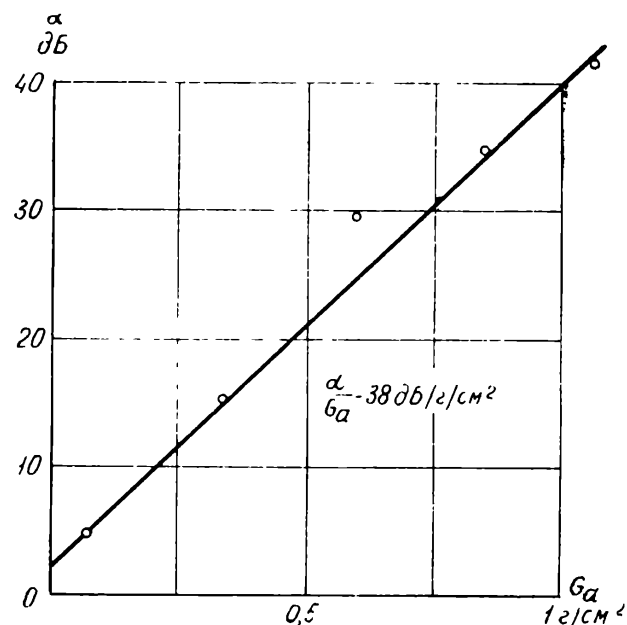


Рис. 6.9. Тарировочная кривая для бетона ( $\delta=10$  см),  $f=10\ 000$  мГц

ния электромагнитных волн в пакете пластинок, в котором одна, две, три, затем все пластинки насыщают водой. На основе проведенных измерений вычерчивают график, изображенный на рис. 6.8, который показывает, как изменяется поглощение электромагнитных волн при  $f = 10\ 000$  мГц в зависимости от количества воды, присутствовавшей в бетоне и отнесенной к  $1\text{ см}^2$  поверхности. Измерения были выполнены на двух сериях пластин с различными данными при разных температурах и на рис. 6.8 видно влияние температуры и частичного физико-химического присоединения несвязанной воды. Однако отметим, что для двух серий наклон кривых практически одинаков и соответствует  $40\text{ дБ/г/см}^2$  [9].

Другие измерения, выполненные в тот же день с пластинками из бетона толщиной  $2\text{ см}$  при общей толщине пакета  $10\text{ см}$  с применением той же аппаратуры, представлены на рис. 6.9. Экспериментальные точки располагаются вдоль прямой с таким же наклоном, как и на рис. 6.8.

Если применяют аппаратуру с частотой, отличающейся от  $10\ 000$  мГц, результаты получаются разные, а именно, поглощение снижается по мере увеличения частоты. На основе аналогичных тарировочных кривых измерения влажности сводятся к измерениям поглощения электромагнитных волн согласно указаниям п. 6.1.3.

Метод был применен [10] для контроля водонепроницаемости различных покрытий, применяемых для окраски стен из ячеистого бетона. Для испытания были приняты окрасочные составы на основе силикатов, тиролита и на основе растворимых в ксилене силиконов. Наиболее эффективная защита от увлажнения стены от атмосферных осадков, оказывается, может быть обеспечена только окрасочными составами на основе растворимых в ксилене силиконов. Измерения поглощения электромагнитных волн могут проводиться для оценки влажности при сезонном увлажнении стен, а также для оценки влияния ориентации стен на степень их насыщения влагой.

Таким образом становится возможным производить измерения влажности бетона непосредственно на крупнопанельных зданиях и, кроме того, принимая во внимание важность высыхания панели до нанесения на ее поверхность водонепроницаемого отделочного слоя, устанавливать оптимальный момент для нанесения влагостойких покрытий [10, 11].

**6.1.4.2. Влияние арматуры на поглощение электромагнитных волн.** Влияние стержней арматуры в бетоне на поглощение электромагнитных волн было изучено на образце, приведенном на рис. 6.10. В том месте, где должна быть расположена арматура, просверлены два отверстия для укладки двух стержней  $\varnothing 12$  мм. Расстояние между осями составляло 5,5 см.

Испытания были проведены при направлении распространения электромагнитных волн параллельно направлению стержней — измеренное затухание составило 32 дБ.

Другой вид измерения был проведен при направлении распространения электромагнитных волн перпендикулярно направлению стержней. В этом случае измеренное затухание было больше и составляло 34,5 дБ.

Измерения, выполненные на образцах только с цилиндрическими отверстиями (без арматуры), показали поглощение электромагнитных волн равным 32,5 дБ.

Следовательно, при укладке двух стержней в случае распространения электромагнитных волн параллельно направлению стержней затухание снизилось на 0,5 дБ, а в случае взаимно перпендикулярных направлений происходит увеличение затухания примерно на 2 дБ.

**6.1.4.3. Определение расхода цемента.** Комбинируя метод определения полного содержания атомов водорода в бетоне, основанный на замедлении быстрых нейтронов, с методом определения содержания несвязанной воды на основе поглощения электромагнитных волн, можно достаточно точно определить количество цемента на единицу объема бетона [21].

Ниже применяются следующие обозначения:

$U_{\Pi}$  — полное количество воды на единицу объема бетона, включая химически связанную воду, определяемую методом замедления быстрых нейтронов;

$G_a$  — количество несвязанной и слабо-связанной воды на единицу поверхности элемента, определяемое методом поглощения электромагнитных волн;

$\delta$  — толщины элемента по направлению распространения электромагнитных волн;

$\epsilon_c$  — отношение между количеством цемента и количеством воды, необходимым для гидратации;

$d$  — расход цемента на единицу объема бетона.

По этим данным расход цемента определяется из выражения

$$d = 2 \left( U_{\Pi} - \frac{G_a}{\delta} \right) \epsilon_c. \quad (6.7)$$

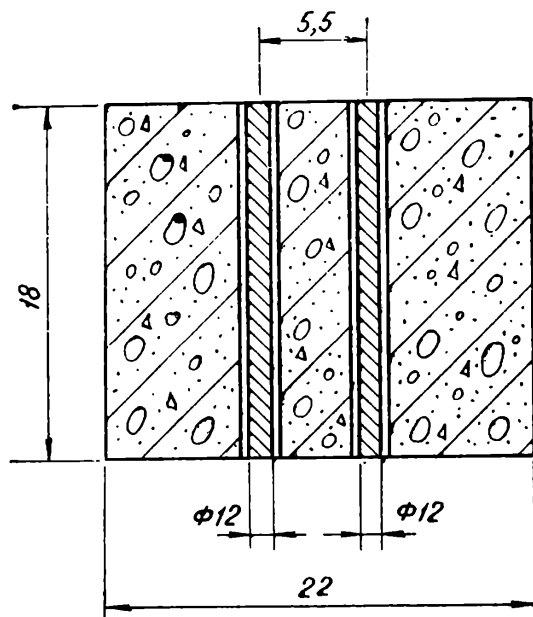


Рис. 6.10. Образец для исследования влияния арматуры



Выражение (6.7) включает известные данные, полученные путем измерений ( $U_{\text{п}}, G_a, \delta$ ), а величина  $\epsilon_c$  характеризующая каждый вид цемента, известна по лабораторным измерениям.

## 6.2. МЕТОД ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

К числу простых методов контроля расположения и определения диаметра арматуры в железобетонных элементах относится метод электромагнитной индукции.

Наиболее благоприятные результаты по этому методу получаются при испытании элементов с редким расположением арматуры, когда отдельные стержни находятся друг от друга на расстоянии, превышающем 10—15 см, а также на относительно близком расстоянии от поверхности (по крайней мере 3—6 см, в зависимости от диаметра) и расположены в одной плоскости или же на достаточно большом расстоянии в разных плоскостях.

Авторы признают, что в условиях, сформулированных выше, можно определять арматуру в слабоармированных плитах и колоннах. Для балок и колонн с мощной арматурой метод не применяется.

### 6.2.1. Принцип электромагнитного метода

Бетон состоит из материалов со слабыми магнитными свойствами (смесь веществ диа- и парамагнитных), а также содержит арматуру со значительными магнитными свойствами и частично вещества, относящиеся к ферромагнетикам. В подтверждение этого факта следует, что магнитное поле, которое в бетоне было равномерным, с введением ферромагнитных материалов и арматуры, изменяет картину, концентрируя силовые линии поля вдоль стержня.

При временном намагничивании внешнее магнитное поле  $\bar{H}$  также увеличивается, возникает дополнительное поле  $\bar{M}_t$ , тогда полная величина поля внутри тела  $B$ , называемая магнитной индукцией, равна:

$$\frac{\bar{B}}{\mu_0} = \bar{H} + \bar{M}_t, \quad (6.8)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость.

Если в формуле (6.8) заменим  $\bar{M}_t$  на  $\chi_m \bar{H}$ , получим

$$\bar{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \bar{H}, \quad (6.9)$$

где  $B$  — магнитная индукция.

Уравнение (6.9) выражает закон намагничивания, который можно записать в таком виде:

$$\bar{B} = \mu \bar{H}, \quad (6.10)$$

где  $\mu$  — коэффициент, называемый магнитной постоянной материала.

Здесь следует обратиться к хорошо известному закону электромагнитной индукции

$$U_c = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6.11)$$

где  $U_c$  — величина ЭДС;  $\Phi$  — магнитный поток.

## 6.2.2. Аппаратура для испытания и ее применение

Приборы для определения арматуры в бетоне, основанные на применении метода электромагнитной индукции, называются пахометрами или коверметрами [13, 14]\*.

В принципе, такой прибор состоит из следующих блоков (рис. 6.11): источника питания 1, обеспечивающего устойчивое постоянное напряжение, обычно 4,5—9 в, получаемое с помощью батареи сухих элементов; преобразователя 2, который преобразует относительно низкое постоянное напряжение в переменное напряжение 12—18 в частотой 400—600 гц. Переменный ток протекает через первичную цепь 3', смонтированную на одной стороне зонда U-образной формы из мягких ферромагнитных материалов. При этом возникает магнитное поле (или магнитная индукция, изменяющаяся по времени), силовые линии которого пересекают вторичную цепь 3'', смонтированную на другой стороне зонда, где индуцируются в переменный ток. Выпрямитель 4 преобразует полученный таким образом переменный ток в постоянный ток. Гальванометр 5 смонтирован последовательно с амперметром (максимальная область измерений 50 мкА) для измерения силы индукционного тока, который тем больше, чем ближе арматура к зонду, а также чем больше ее диаметр.

Существует достаточно большое количество фирм, изготавливающих пахометры, среди которых наиболее известная Pгоsecq (Швейцария), использующая французский тип пахометра ТЕВА в различных вариантах: тип N6, предназначенный для измерения защитного слоя бетона толщиной не более 6 см;

\* В СССР аналогичный прибор носит название ИЗС-2 (примеч. науч. ред.).

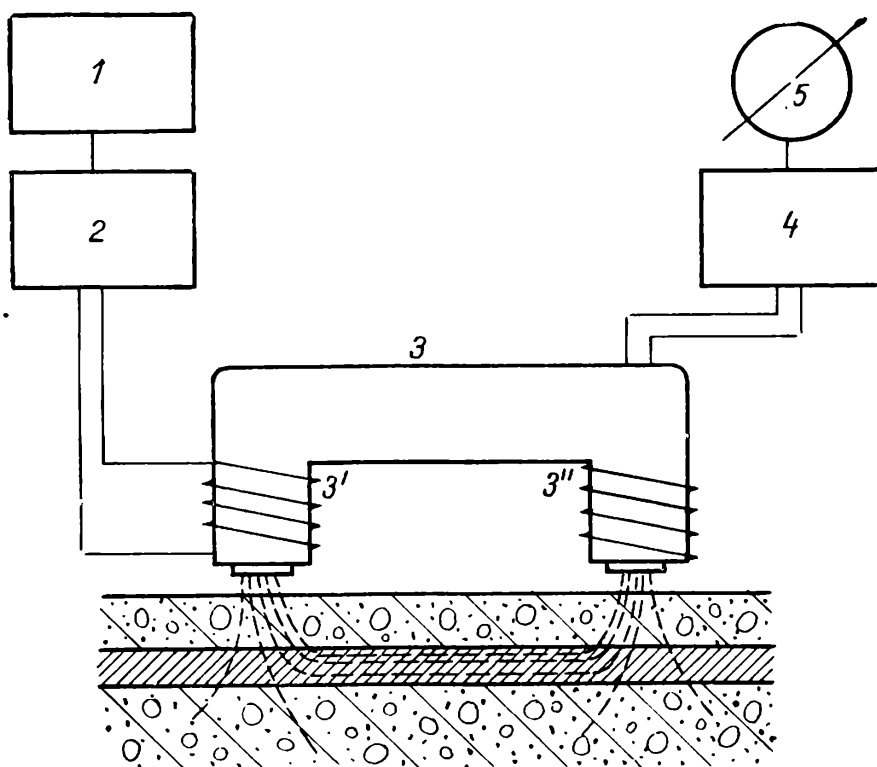


Рис. 6.11. Принципиальная схема пахометра

тип Е4 (рис. 6.12); этот прибор позволяет обнаруживать арматуру на глубине 12 см (естественно, при условии соответствующего ее расположения).

Оба типа приборов питаются от батареи. Замена их производится каждый раз, когда стрелка индикатора приближается к нулю (вертикальная отметка со знаком  $\Delta$ ) или непрерывно дрожит.

Регулирование нуля прибора производится с помощью потенциометра переменного тока 6 (рис. 6.12). Интервал температуры, при котором применяется прибор, от 5 до 40° С. При температуре ниже 5° С батареи необходимо время от времени подогревать.

Оба прибора выполнены на транзисторах. По длине зонды покрыты изоляцией около 15 см для типа N6 и около 25 см для типа Е4, соответственно расстояние между осями полюсов 7 и 14 см.

Способ применения прибора: сначала удаляют зонд 1, соединенный с кабелем 3, снаружи кожуха и удаляют все предметы из ферромагнетиков, включая элементы, которые подлежат проверке.

Затем нажатием выключателя 4 включается питание прибора. В этом положении стрелка 5 гальванометра переходит из нулевого положения в любое положение где-либо на шкале прибора. Она может быть приведена с помощью потенциометра 6 в положение, соответствующее отметке  $\Delta$  (вертикальной). Эта операция заключается в регулировании нуля; время от времени следует эту операцию повторять, чтобы компенсировать возможное уменьшение напряжения в сети питания в процессе эксплуатации прибора.

В процессе работы необходимо избегать укорачивания полюсов зонда, поскольку это может привести к повреждению гальванометра. Прибор снабжен измерителем расстояния (рейкой) 2, который обеспечивает удаление зонда на заданное расстояние от поверхности бетона, с учетом выполнения так называемых дублированных измерений для определения одновременно толщины защитного слоя бетона и диаметра арматуры.

Специальный тип пахометра был осуществлен Л. Брунарски и А. Кармински (ITB — Варшава) [15]. Такой прибор позволяет при применении зонда на поверхности бетона одновременно определять как диаметр арматуры, так и толщину защитного слоя. Для этой цели используют дополнительные два индуктирующие поля различной интенсивности. Получают результат, который сопоставляют с данными, представленными дублированными измерениями в соответствии с п. 6.2.3. Частота переменного тока в приборе составляет 425 гц.

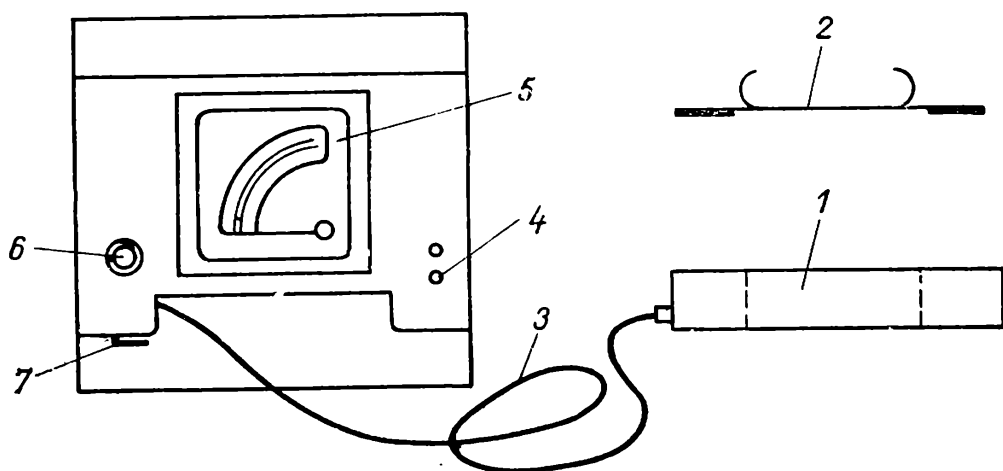


Рис. 6.12. Пахометр типа Е

### 6.2.3. Применение метода электромагнитной индукции

**6.2.3.1. Определение положения и направления арматуры.** Непосредственным и более простым применением является метод пахометра, заключающийся в определении собственно арматуры и ее направления.

Для этого необходимы следующие условия: расстояние между стержнями арматуры должно быть более 10—15 см в зависимости от диаметра стержня; стержни должны быть расположены в одном ряду; для стержней в зависимости от диаметра защитный слой бетона должен быть не более 6—8 см.

Эти условия соблюдаются в плитах и колоннах, слабо и нормально армированных. В балках, где расстояние между стержнями почти всегда меньше 10 см, эти условия не соблюдаются, арматура в них укладывается во многих случаях в два ряда. В железобетонных перекрытиях с повышенным содержанием арматуры расстояние между стержнями превышает 6—8 см, однако расположение хомутов вблизи зонда оказывает значительное влияние на измерения.

При измерении зонд устанавливается на поверхности бетона примерно в тех местах, где приблизительно установлена арматура. Зонд перемещается в одном направлении, перпендикулярном к направлению арматуры. В этом случае стрелка гальванометра переходит от конца шкалы до положения минимума. В этот момент перемещение зонда прекращается; далее испытание производится путем вращения зонда с одновременным непрерывным отклонением стрелки индикатора до минимума. Когда становится невозможным дальнейшее отклонение стрелки прибора, это означает, что положение зонда совпадает как с расположением арматуры, так и с приблизительным направлением стержней.

Показания шкалы индикатора гальванометра изменяются в зависимости от положения зонда для случая, когда стержни удалены друг от друга (свыше 12—15 см). Если стержни расположены на расстоянии меньшем, чем 6—10 см, в зависимости от диаметра, точное установление их уже невозможно.

В многочисленных случаях арматура, даже изолированная, является слишком близко расположенной от поверхности бетона для того, чтобы сразу расшифровать показания гальванометра. В этом случае отмечается, что после того, как достигнут минимум на конце шкалы, стрелка снова направляется к нулевому показанию. Потом, по мере того как зонд удаляется от стержня, получают новый минимум и новое увеличение отсчета. В таком случае изолированный стержень находится в середине зоны.

Метод пригоден для применения в плитах, где расположение арматуры позволяет обнаруживать ее в различных зонах.

**6.2.3.2. Определение толщины защитного слоя бетона над арматурой.** По этому методу в первую очередь предполагаются известными диаметры стержней.

Следует также уточнить, что определение защитного слоя бетона  $S$  производится с помощью пахометра. Если сравним величину защитного слоя с измеренной величиной, то получим уравнение

$$a = C + \frac{\varnothing}{2}, \quad (6.12)$$

где  $\varnothing$  — диаметр стержня арматуры.

Определение толщины защитного слоя стержня производится в соответствии с указаниями 6.2.3.1.

Для специальной арматуры различного профиля — прямоугольного, овального, периодического профиля, проволоки, арматурных сеток и т. д. — необходимо применять так называемый метод сравнения, который излагается в этом разделе.

Случай изолированного стержня является наиболее простым, но редким. Чтобы можно было учесть один изолированный стержень, необходимо, чтобы расстояние по отношению к соседнему стержню удовлетворяло требованиям, приведенным для пахометра  $E$  [16, 17].

В том случае, когда диаметр изолированного стержня известен, величину защитного слоя можно определить путем непосредственного считывания по шкале прибора [18]. Характерная точка в измерениях находится на пересечении линии, намеченной стрелкой прибора с кривой на шкале, отражающей фактический диаметр стержня. Защитный слой стержня необходимо определять путем интерполяции по шкале прибора между кривыми, отражающими одинаковую толщину защитного слоя.

Наиболее сложное положение создается при определении защитного слоя для близко расположенных стержней [19].

В связи с утверждением, что только два стержня, сваренные по длине, расположенные в одной горизонтальной плоскости, работают как стержень одного диаметра, эквивалентного двойному, точно так же и в отношении защитного слоя спаренных стержней, расположенных в одной вертикальной плоскости, принимается, что они эквивалентны  $1,5 \varnothing$ .

К особому случаю определения защитного слоя относится расположение стержней в углах, если они достаточно удалены друг от друга, как, например, в колоннах [20]. В таких случаях для определения защитного слоя и расположения арматуры необходимо производить измерения по двум сторонам.

Сложная ситуация складывается для измерений на арматурных сетках для армирования плит. Если одна сторона сетки  $l$  больше 30 см для пахометра  $E4$  и 17 см для пахометра  $N6$ , тогда измерения для определения защитного слоя производят в средней точке какой-либо стороны. Если другая сторона ячейки арматурной сетки  $l_2$ , ее размеры должны заключаться в пределах:

для пахометра  $E4$

$$15 \text{ см} < l_2 < 30 \text{ см};$$

для пахометра  $N6$

$$7 \text{ см} < l_2 < 17 \text{ см}.$$

Измерение защитного слоя пахометром в арматурных сетках с ячейками меньше 15 см в стороне для пахометра  $E4$  и для ячеек со стороной меньше 7 см для пахометра  $N6$  не допускается. Проверка защитного слоя в крупных железобетонных элементах со сложным армированием производится методом сопоставления.

Метод заключается в измерениях с помощью пахометра на сборных элементах в местах, предусмотренных для определения защитного слоя, а затем

выполняются аналогичные измерения на незабетонированных арматурных каркасах в тех же самых точках, применяя также прибор — измеритель расстояния до получения отклонений по индикатору, идентичных с измеренными на бетоне. Толщина защитного слоя  $C$ , измеренная прибором, соответствующая определенному месту, определяется уравнением (6.12).

**6.2.3.3. Определение толщины.** Частным случаем при измерениях защитного слоя бетона является определение толщины. Такие измерения можно выполнить для обыкновенного бетонного блока без арматуры, используя кусок арматурного стержня определенного диаметра, который закреплен на одной стороне стены. Пахометр располагают на противоположной стороне, перемещая его до тех пор, пока не получают показаний с максимальным отклонением. В этот момент определяют пересечение кривой на шкале, относящейся к определенному стержню, с положением стрелки индикатора. Таким образом может быть определена полная толщина элемента. По этому методу можно определить толщину элементов до 6 см с помощью пахометра N6 и до 12 см пахометром E4, используя стержни большого диаметра.

В случае армирования элементов редкой сеткой со стороной более 17 см для применения пахометра N6 и более 30 см для пахометра E4, если известен диаметр арматуры, применяемой в сетке, можно определить и толщину элемента. С этой целью производят испытания с двух противоположных сторон элемента и измеряют защитные слои. Измерения необходимо проводить в соответствии с определенным диаметром арматуры.

Защитные слои  $C_1$  и  $C_2$ , будучи известными, позволяют определить полную толщину железобетонного элемента из выражения

$$b = C_1 + C_2 + \varnothing, \quad (6.13)$$

где  $\varnothing$  — диаметр стержня.

С помощью этого метода можно определять толщины железобетонных образцов до 10 см с помощью пахометра N6 и до 20 см пахометром E4, если арматурная сетка расположена приблизительно центрально по отношению к обеим сторонам образца.

## 7. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ

### 7.1. ВВЕДЕНИЕ

На определенной стадии развития неразрушающих методов становится ясным, что использование одного метода, как бы он ни был удачно выбран, не дает возможности повысить точность определения прочности сверх определенного предела. Используются два пути повышения точности результатов испытания неразрушающим методом:

проведение параллельного неразрушающего и разрушающего испытаний образца, изготовленного из того же бетона, что и конструкция, и получение экспериментальной кривой зависимости между параметром неразрушающих испытаний и прочностью при сжатии;

использование информации, касающейся приготовления и твердения бетона, который подвергается испытанию, для выбора соответствующей ранее составленной тарировочной кривой.

Если  $X_i$  — параметр, полученный непосредственным измерением при неразрушающих испытаниях, функциональная зависимость между этой величиной и прочностью в общем виде запишется так:

$$R_c = f_m(X_i). \quad (7.1)$$

Заметим, что отдельный неразрушающий метод дает только частичную информацию о факторах, от которых зависит прочность. Допустим, что соотношение между прочностью и основными факторами, которые ее определяют, существует в общем виде:

$$R_c = F(c, d, B/C, g, \eta, n, m, u, v), \quad (7.2)$$

где  $c$  — вид применяемого цемента;  $d$  — расход цемента;  $B/C$  — водоцементное отношение;  $g$  — зерновой состав заполнителя;  $\eta$  — поверхностное сцепление заполнителя с раствором;  $n$  — вид заполнителя;  $m$  — условия твердения и возраст бетона;  $u$  — влажность среды;  $v$  — степень уплотнения бетона.

Ультразвуковой импульсный метод, основанный на измерении скорости распространения ультразвука, дает точную информацию о влиянии отношения  $B/C$  и  $v$ . По этому методу преувеличивается влияние факторов  $g$ ,  $n$  и  $u$  и недооценивается влияние факторов  $d$ ,  $c$ ,  $m$  и  $\eta$ .

Ультразвуковой импульсный метод, основанный на измерении затухания, во многом сходен с методом измерения скоростей, но есть и отличие, которое заключается в более правильной оценке влияния влажности ( $u$ ) и снижении чувствительности к зерновому составу ( $g$ ).

Особенности резонансного метода не анализируются, поскольку этот метод является лабораторным.

Метод поверхностной твердости дает правильную информацию в отношении факторов  $c$ ,  $B/C$  и в меньшей степени  $g$  и  $v$ . По этому методу преуве-

лично оценивается влияние фактора  $m$  и недооценивается влияние факторов  $d$ ,  $\eta$ ,  $n$  и  $u$ .

Метод, использующий поглощение гамма-излучения, дает правильную оценку в отношении фактора  $\nu$ , преувеличенную в оценке влияния факторов  $g$ ,  $u$ , и полностью не реагирует на факторы  $c$ ,  $d$ ,  $\eta$ ,  $m$ , а частично и на отношение  $B/C$ .

Из этих соображений можно сделать вывод о том, что только ультразвуковые методы и гамма-излучение дают информацию в отношении качества всей толщины проверяемого элемента, тогда как метод поверхностной твердости ограничивается исследованием слоя 1—2 см от поверхности. В то же время методы поверхностной твердости полезны потому, что они отражают влияние таких факторов, к которым нечувствительны ультразвуковой и  $\gamma$ -метод. Отсюда возникает потребность в комплексном использовании неразрушающих методов, имеющих различную физическую основу.

## 7.2. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД НАЛОЖЕНИЯ

Наиболее простым шагом на пути комбинирования информации, которую можно получить от различных неразрушающих методов, представляет собой предложение, сформулированное Б. Г. Скрамтаевым и М. Ю. Лещинским [1] и названное в этой работе методом наложения (суперпозиции).

Предположим, что располагаем данными двух неразрушающих методов для определения прочности бетона и что, используя функцию взаимного соответствия между параметрами, полученными неразрушающим методом  $x_i$  и прочностью бетона  $R$ , можем записать:

$$R = f_1(X_n); \quad (7.3)$$

$$R = f_2(X_m); \quad (7.4)$$

получим два разных значения прочности  $R_1$  и  $R_2$ .

Отметим методы индексами 1 и 2 и предположим, что

$$R_2 > R_1. \quad (7.5)$$

В каждом методе прочность получают с определенной точностью. Если запишем через  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  относительные возможные ошибки в каждом методе, получим значения прочности, связанные такими уравнениями:

$$\varepsilon' = \pm \frac{\Delta R'}{R_1}; \quad (7.6)$$

$$\varepsilon'' = \pm \frac{\Delta R''}{R_2}, \quad (7.7)$$

где  $\Delta R'$  и  $\Delta R''$  — интервалы значений прочности  $R_1$  и  $R_2$ , в которых может оказаться с данной вероятностью действительная прочность бетона.

Предельные значения этих интервалов будут для метода 1:

$$R_3 = R_1 - \Delta R'; \quad (7.8)$$

$$R_4 = R_1 + \Delta R', \quad (7.9)$$



а для метода 2

$$R_5 = R_2 - \Delta R''; \quad (7.10)$$

$$R_6 = R_2 + \Delta R''. \quad (7.11)$$

Все возможные ситуации могут быть описаны следующими случаями.

**Случай 1.** Область изменений прочности определяется с помощью двух простых неразрушающих методов путем частичного наложения один на другой (рис. 7.1). В этом случае, принимая во внимание неравенство (7.5), необходимо, чтобы было удовлетворено условие

$$R_6 > R_4 > R_5 > R_3. \quad (7.12)$$

Из этого следует, что действительная прочность бетона  $R_c$  может находиться в области

$$R_5 \leq R_c \leq R_4. \quad (7.13)$$

Поскольку интервал  $(R_5, R_4)$  небольшой, действительная прочность определяется довольно точно. Для случая 1 действительная прочность бетона определяется из уравнения

$$R_c = \frac{R_4 + R_5}{2}. \quad (7.14)$$

**Случай 2.** Область изменений прочности, полученная по методу 1, полностью находится внутри границ разброса, характеризующих метод 2, и первый метод предположительно имеет более высокую точность (рис. 7.2). Этот случай выражается неравенством

$$R_6 > R_4 > R_3 > R_5. \quad (7.15)$$

Из этого следует, что действительная прочность бетона при сжатии находится внутри области, ограниченной разбросом для метода 1, и тогда

$$R_c = R_1. \quad (7.16)$$

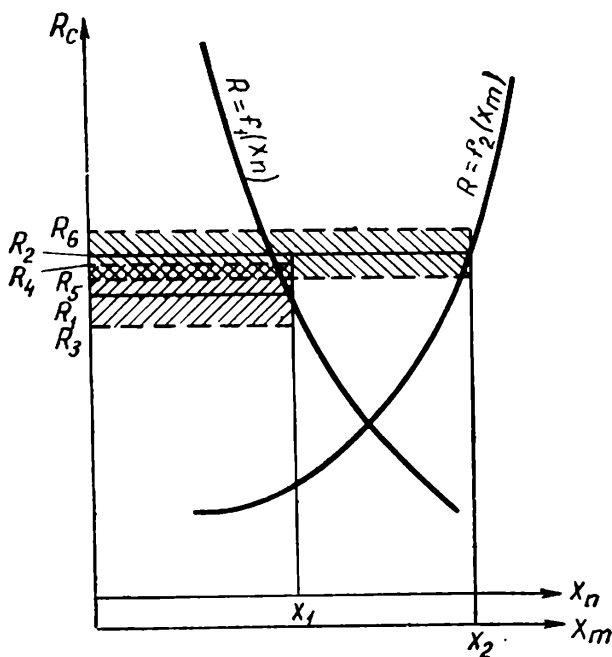


Рис. 7.1. Область частичного наложения

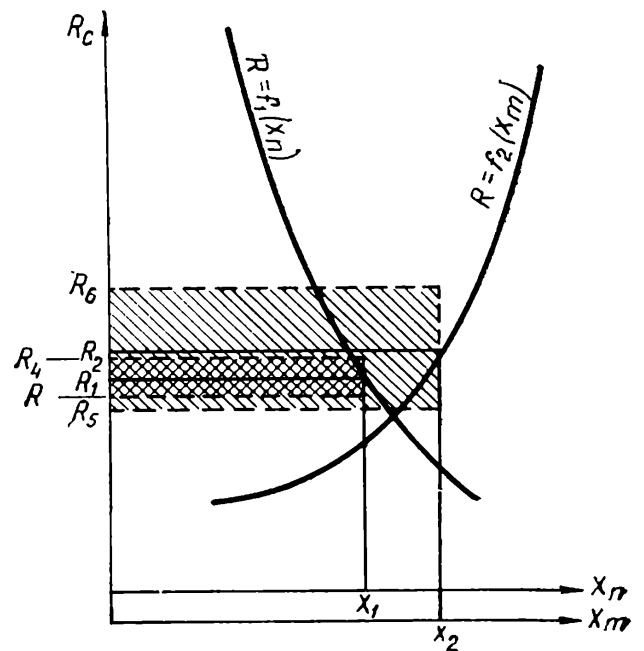


Рис. 7.2. Область полного наложения — метод 1 определяющий

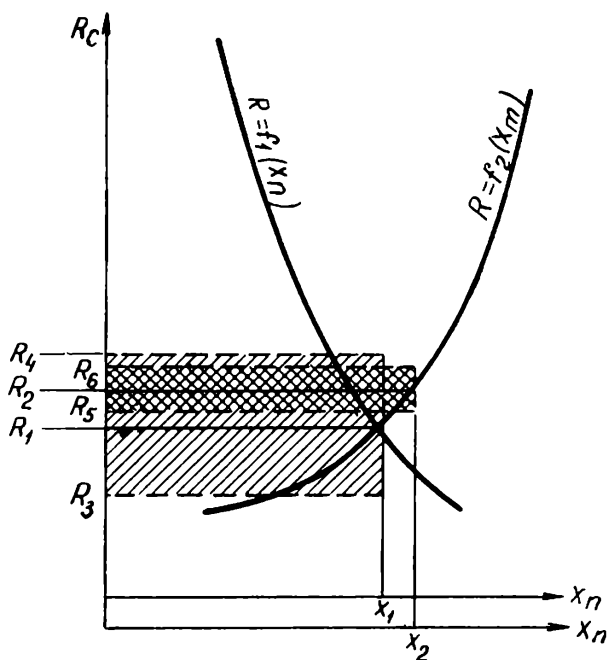


Рис. 7.3. Область полного наложения — метод 2 определяющий

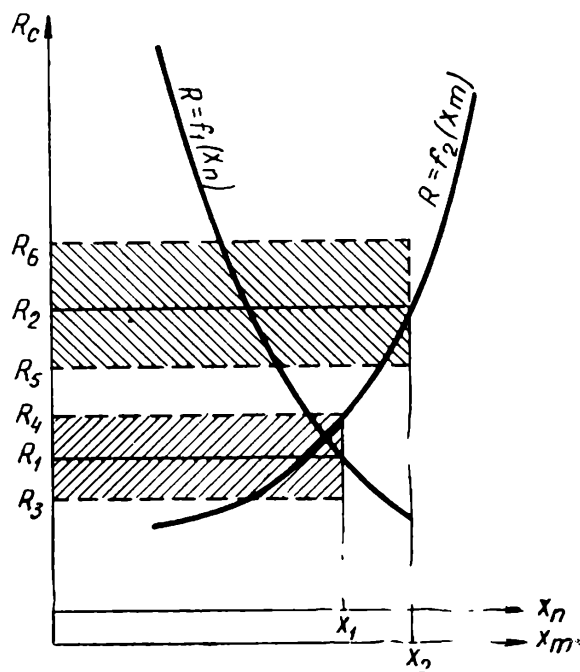


Рис. 7.4. Область неналожения

**Случай 3.** Область изменений прочности, характеризуемая методом 2, находится полностью внутри границ разброса, характеризующих метод 1. Метод 2 имеет, следовательно, более высокую точность (рис. 7.3).

Действительная прочность бетона находится внутри области, определяемой методом 2, и наиболее вероятное значение, которое может быть установлено для этой прочности:

$$R_c = R_2. \quad (7.17)$$

**Случай 4.** Области изменений прочности по двум методам не имеют общей зоны (рис. 7.4). В этом случае имеется неравенство

$$R_6 > R_5 > R_4 > R_3. \quad (7.18)$$

Данное неравенство представляет случай, который может быть в различных практических ситуациях благодаря недостаточно точному определению одной из величин:  $R_1$  или  $R_2$  неправильным представлением о точности методов и т. п.

В такой ситуации комбинирование двух методов невозможно, и рекомендуется повторить измерения, провести перепроверки тарировочных кривых и вновь пересмотреть точность метода. Если ни одним из этих путей нельзя достигнуть наложения областей разброса согласно рис. 7.4, первоначально избранную комбинацию методов необходимо исключить и заменить другой комбинацией неразрушающих методов. Если и эту работу невозможно выполнить, можно взять грубо ориентировочное значение прочности:

или

$$\left. \begin{aligned} R_c &= \frac{R_4 + R_5}{2} \\ R_c &= \frac{R_1 + R_2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7.19)$$

Оба значения получаются неточными, но каковыми они ни были бы, в это надежнее, чем отдельно взятые значения  $R_1$  или  $R_2$ .

В заключение следует отметить, что комбинированный метод, учитывающий дополнительную информацию, хотя и не приносит с физической точки зрения ничего нового, все же повышает точность оценки прочности бетона неразрушающими методами [2]. Нельзя комбинировать неразрушающий метод высокой точности с методом невысокой точности, а также бесполезно комбинировать такие типы неразрушающих методов, информация в которых зависит от общих факторов.

### **7.3. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД:**

#### **СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА — ПОКАЗАТЕЛЬ ОТСКОКА**

Комбинация скорости распространения ультразвука с показателем отскока наиболее распространена в Румынии [3] для определения прочности бетона и имеет следующие преимущества:

возможны испытания бетона в конструкциях и сооружениях в элементах любых размеров;

составные части комбинированного метода принадлежат к разным физическим группам и дают информацию в отношении разных видов соотношений между измеренными параметрами и прочностью бетона;

результаты определений прочности комбинированным методом по-разному зависят от условий твердения и влажности испытываемого бетона;

прочности бетона получают путем определения зависимости от зернового состава заполнителя или дозировки цемента, что является дополнением по сравнению с ультразвуковым импульсным методом, простота которого может быть принята как основа для дискуссии;

в комбинированном методе имеется часть информации, которая касается глубинного слоя бетона.

Нельзя считать, что этот метод дает одни только преимущества. Имеются также и серьезные ограничения: для определения прочности метод нельзя применять в зонах с местными дефектами, предполагаемыми или скрытыми (пустоты, трещины, расслаивания);

нельзя применять метод и в случаях, когда бетон неодинакового качества в поверхностных слоях и в глубинных;

метод не применим в зонах с большим скоплением арматуры, в особенности когда она ориентирована по направлению распространения ультразвуковых импульсов.

**7.3.1. Стандартный комбинированный метод, принятый в Румынии.** Комбинированный метод: скорость распространения ультразвука — показатель отскока, принятый в Румынии в качестве стандартного [4], основывается на проведении на одном и том же бетоне одновременно измерений скорости распространения ультразвука и показателя отскока для определения прочности на сжатие.

Одновременное использование двойной информации производится с помощью построения графика, в котором по абсциссе откладывается скорость распространения ультразвуковых продольных волн, измеренная при постоянной амплитуде переднего фронта импульса (3 см), а по ординате отклады-

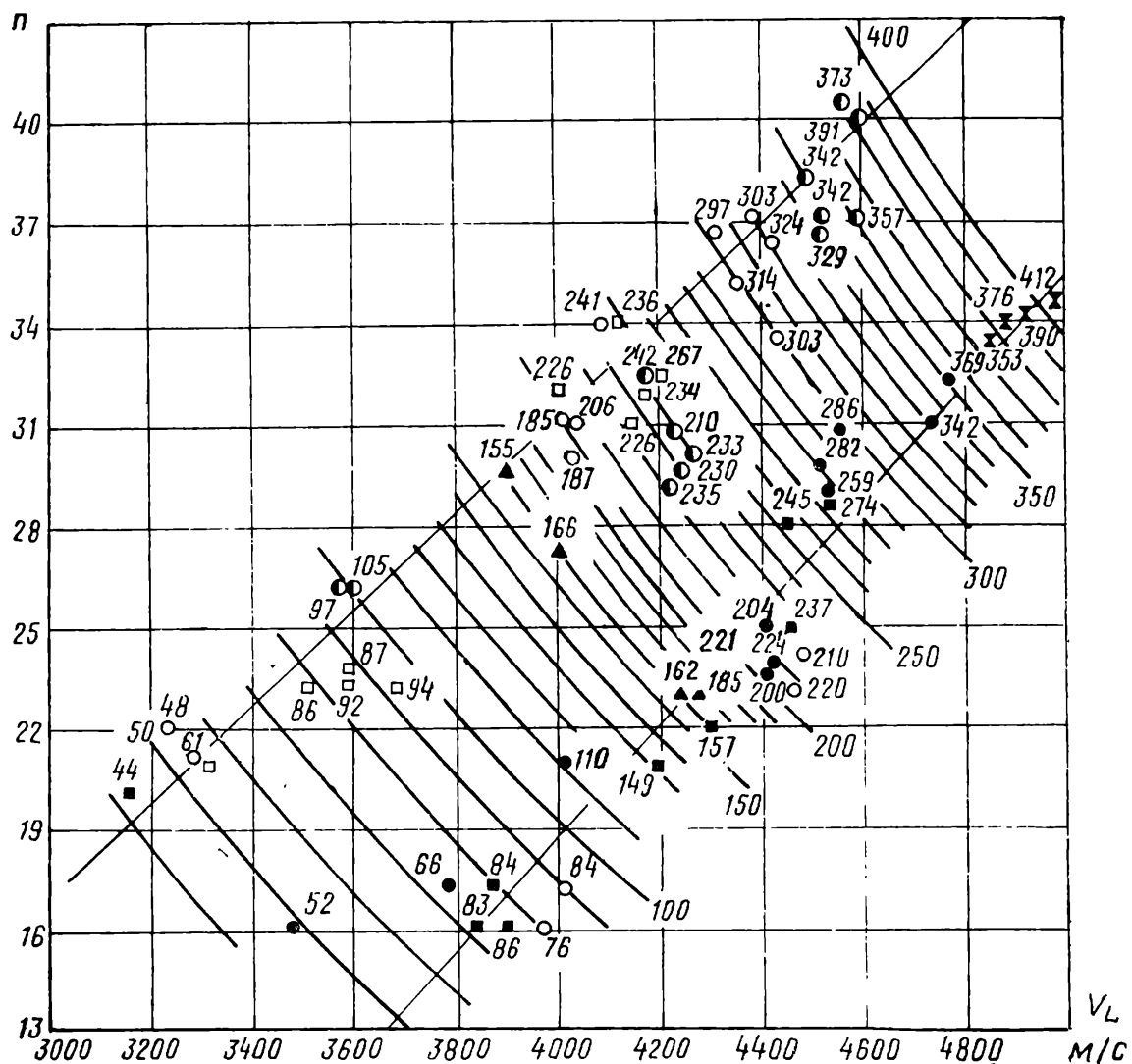


Рис. 7.5. Влияние возраста и влажности бетона в комбинированных методах,  $V_L-n$   
 ● — хранение в стандартных условиях 28 сут.; ○ — хранение на открытом воздухе 28 сут.;  
 ● — хранение в воде 28 сут.; □ — хранение на открытом воздухе 7 сут.; △ — то же, 3 сут.;  
 ◊ — хранение в воде 6 мес.; ◊ — то же, 7 сут.; ▲ — то же, 3 сут.

ваются измеренные показания отскока, полученные с помощью склерометра Шмидта типа N.

По этим данным каждая пара значений, полученных в неразрушающих испытаниях, соответствует одной точке. Поскольку как скорость распространения, так главным образом показатель отскока зависят от местной неоднородности бетона и непосредственно использовать пару значений двух измеренных показателей комбинированного метода не следует, рекомендуется брать среднее из двух или трех измерений скорости распространения ультразвука и среднюю оценку из шести измерений показателя отскока, выполненных на одном и том же участке.

Если рядом с точками на графике  $n - v_L$  запишем значения прочности, определенные разрушающими испытаниями на соответствующих образцах, получим диаграмму, изображенную на рис. 7.5. На диаграмме вычерчены кривые одинаковой прочности, полученные по данным испытания на прессе кубов со стороной 20 см. Испытанные бетоны отличаются условиями твердения, возрастом, влажностью и степенью уплотнения; остальные параметры, относящиеся к составу бетона, постоянные.

Можно отметить тот факт, что полученные кривые одинаковой прочности имеют наклон к координатным осям около 45° и практически параллельны между собой. По мере того как увеличивается скорость ультразвука, показатель отскока также увеличивается.

Размещение характерных точек вдоль кривой одинаковой прочности диктуется в первую очередь влажностью бетона и в меньшей степени зрелостью его. Если рассмотреть одну кривую равной прочности, то в верхней ее части будут располагаться результаты испытаний бетона с пониженной влажностью (образцы, хранившиеся на воздухе), а в нижней — находятся результаты, полученные для бетонов с высокой влажностью (насыщенные, хранившиеся под водой).

**7.3.2. Факторы, которые влияют на корреляцию «показатель комбинированного неразрушающего метода — прочность бетона».** Факторы, которые влияют на корреляцию между скоростью ультразвука и показателем отскока, с одной стороны, и прочностью бетона при сжатии, с другой [5, 6, 7], следующие:

- вид и расход цемента;
- происхождение и зерновой состав заполнителя.

Наиболее важным фактором является, несомненно, расход цемента. Экспериментальные результаты, которые иллюстрируют влияние этого фактора, приведены на рис. 7.6 для бетонов с расходом цемента в пределах от 200 до 500 кг/м³. Из сопоставления результатов по каждой экспериментальной точке со значениями, указанными на кривой равной прочности, следует, что по мере увеличения расхода цемента значения прочности и показатели неразрушающих испытаний увеличиваются. Если принять в качестве исходного расход цемента 300 кг/м³, принятый для бетона на рис. 7.5, то действительную прочность образца, приготовленного с различным расходом цемента, находят с учетом поправочных коэффициентов:

расход цемента	200	кг/см³	0,86—0,92
»	»	300	»
»	»	400	1,11—1,16
»	»	500	1,22—1,27

Эти значения меньше отличаются от единицы, чем те, которые указаны в п. 2.5.10 (табл. 2.8) для учета влияния расхода цемента в случае применения ультразвукового импульсного метода; таким образом, подтверждается преимущество комбинированного метода.

Испытания были выполнены на портландцементях с добавками или без них Р400, РZ400, С400. Однако если испытания были проведены с цементами, которые сильно отличаются от указанных, главным образом цемент RIM (с большой начальной прочностью) или F (с добавкой свыше 40% шлака), тогда вид цемента влияет на отношение между параметрами, полученными по неразрушающим испытаниям, и прочностью (рис. 7.7).

Зависимость между прочностью бетонов на разных цементах и той, которую имеет исходный («стандартный») бетон на обыкновенном портландцементе, можно отразить поправочными коэффициентами.

цемент RIM	. . . . .	1.08—1.11
» F	. . . . .	0,88—0,92

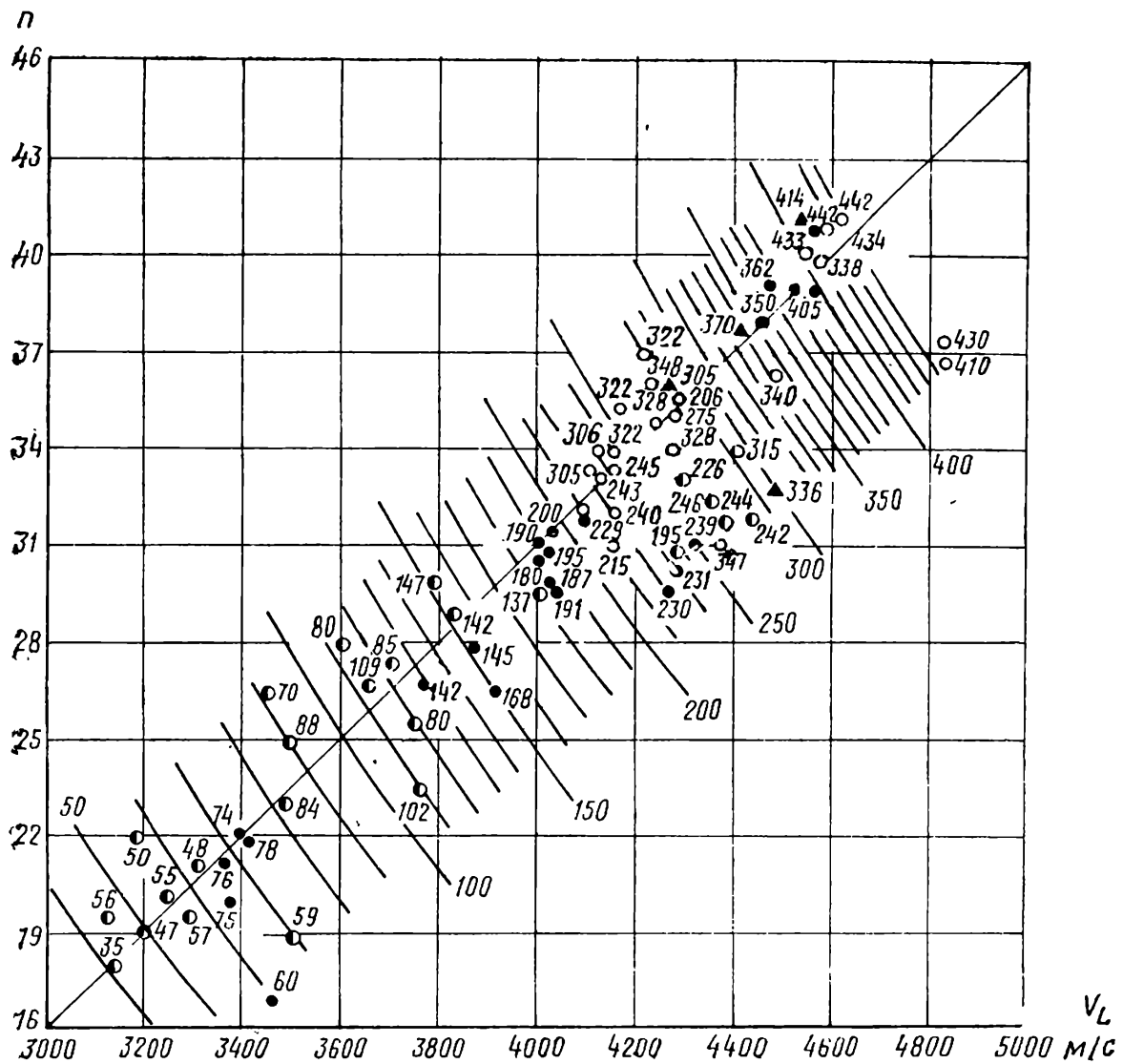


Рис. 7.6. Влияние количества цемента в комбинированных методах  
 ▲ — 500 кг/м<sup>3</sup>; ○ — 400 кг/м<sup>3</sup>; ● — 300 кг/м<sup>3</sup>; ◐ — 200 кг/м<sup>3</sup>

Эти значения меньше отличаются от единицы, чем указанные в п. 2.5.10.3 (табл. 2.7) для ультразвукового импульсного метода, что также подтверждает преимущество применения комбинированного метода в том случае, когда имеется сомнение в отношении вида применяемого цемента.

Переходим к исследованию влияния заполнителя. В качестве исходного принимается кварцевый заполнитель — речной или карьерный, в большинстве случаев применяемый для бетона в Румынии. Для этого заполнителя исследовалось влияние зернового состава. В данном случае, как и в ультразвуковом методе, применяются два параметра для характеристики зернового состава: количество заполнителя мелкой фракции (0—1 мм) и максимальный размер заполнителя.

Для изучения влияния количества мелких фракций был приготовлен бетон, в котором их содержание изменялось в пределах 6—45%. Результаты испытаний, в которых была использована система кривых равной прочности, приведены на рис. 7.8. На основании исследований и построения зависимости  $R_{ef}/R_{st}$ , в которой  $R_{ef}$  — прочность, полученная испытаниями

на прессе, а  $R_{st}$  — прочность, полученная для стандартного состава бетона, в котором мелкая фракция 0—1 мм составляла 12% по весу заполнителя, могут быть рекомендованы следующие поправочные коэффициенты:

для 6%	.....	0,95—0,96
» 18%	.....	1,03
» 30%	.....	1,06—1,09
» 48%	.....	1,13—1,16

Эти значения показывают, что по мере того как процентное содержание мелких фракций увеличивается, прочность, определенная неразрушающими испытаниями, также увеличивается. Однако это влияние не столь значительно, как в ультразвуковом импульсном методе (см. п. 2.5.10, табл. 2.10). Коэффициенты влияния примерно вдвое дальше от единицы, чем поправочные коэффициенты комбинированного метода. Поэтому при случайных изменениях зернового состава заполнителя можно быть уверенным, что ошибки, которые будут получены благодаря применению комбинированного метода, окажутся приблизительно наполовину меньше тех, которые даст ультразвуковой импульсный метод.

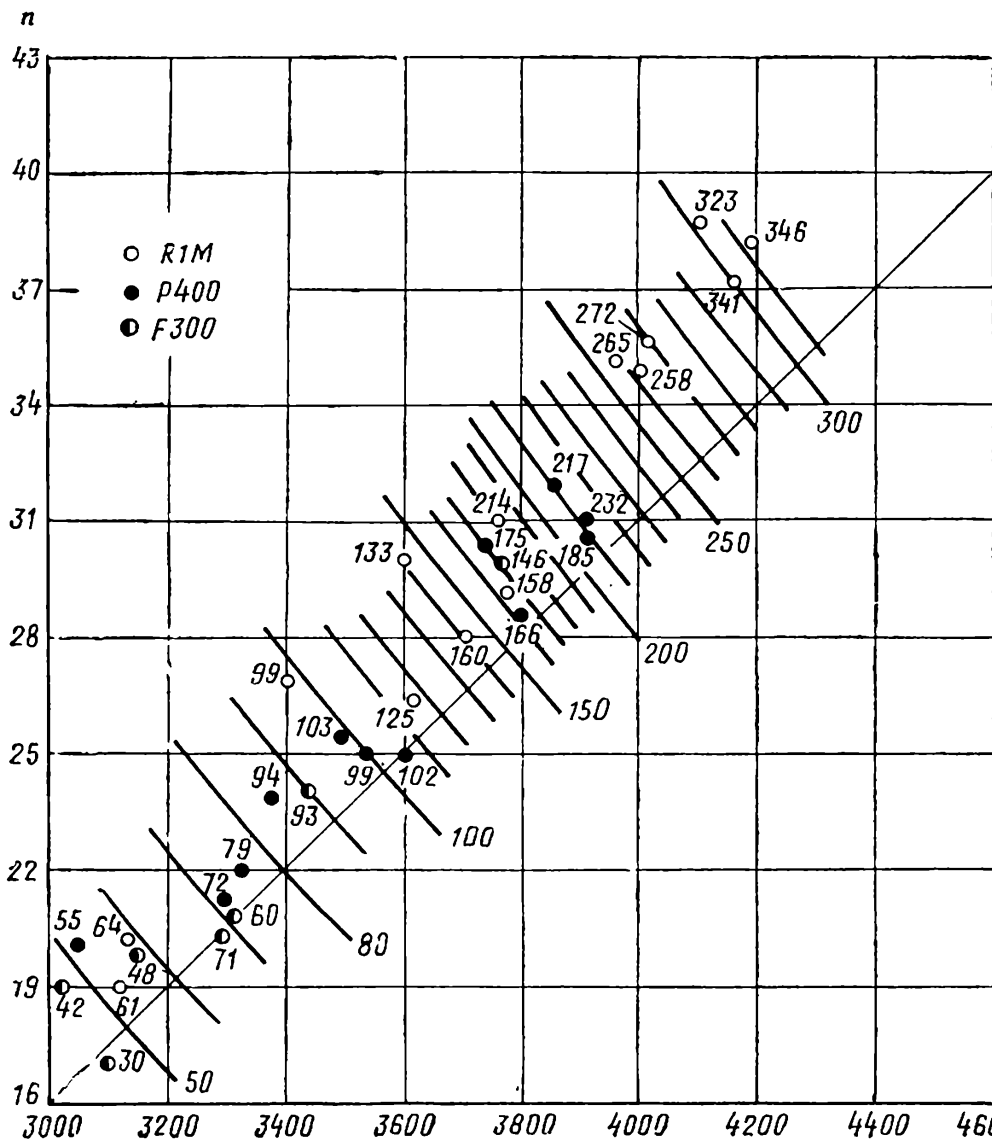


Рис. 7.7. Влияние вида цемента в комбинированных методах,  $V_L$ — $n$

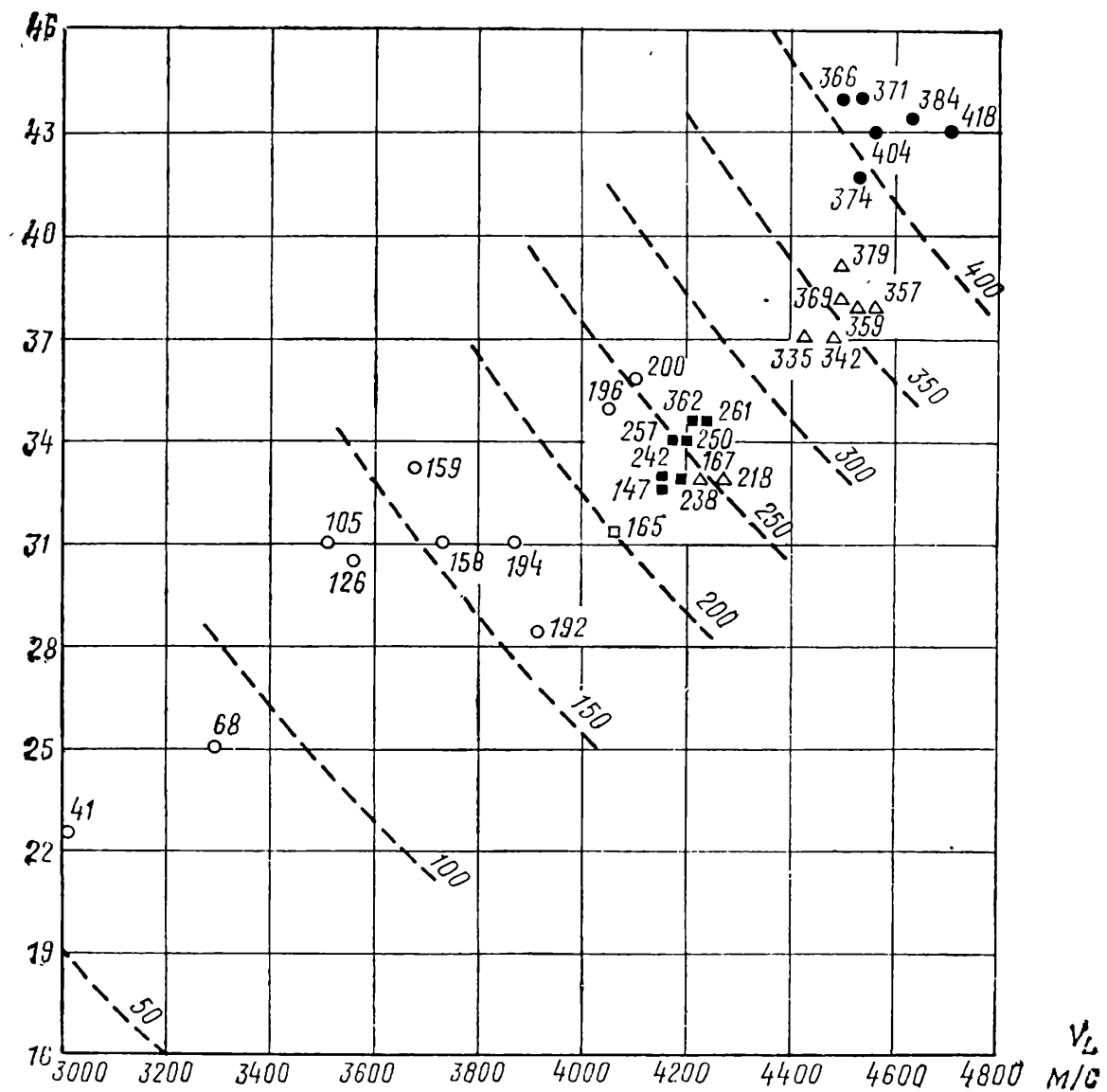


Рис. 7.8. Влияние количества мелких фракций заполнителя в комбинированных методах,  $V_L - n$

● — 6%, фракция 0,1 мм; △ — 18%, фракция 0—1 мм; ■ — 30%, фракция 0—1 мм; ○ — 45%, фракция 0—1 мм

Другой фактор, который определяет зерновой состав заполнителя, — его максимальный размер. Для исследования влияния этого фактора принят бетон с заполнителем, максимальный диаметр которого был 7, 30 и 70 мм. Результаты испытания с использованием системы кривых равной прочности для стандартного бетона с заполнителем  $\varnothing_{\text{макс}} = 30$  мм (пунктирная линия на графике) и для бетона с заполнителем  $\varnothing_{\text{макс}} = 70$  мм (сплошная линия) приводятся на рис. 7.9. Путем вычисления отношения  $R_{ef}/R_{st}$ , в котором  $R_{st}$  — прочность стандартного бетона с максимальным диаметром заполнителя 30 мм, получены следующие значения для поправочных коэффициентов:

для $\varnothing_{\text{макс}} = 7$ мм	. . . . .	1,07—1,11
» $\varnothing_{\text{макс}} = 70$ »	. . . . .	0,95—0,96

Эти значения показывают, что по мере того, как увеличивается максимальный диаметр заполнителя, снижается соответствующее значение проч-



ности того же элемента согласно измеренным парным величинам «скорость ультразвука — показатель отскока». Сопоставляя значения поправочных коэффициентов с полученными по ультразвуковому импульсному методу (см. п. 2.5.10.10), констатируем, что отклонения этих коэффициентов от единицы снижаются приблизительно наполовину, что отражает преимущество применения комбинированного метода в случаях, когда не имеется гарантии в соблюдении заданного максимального диаметра заполнителя.

Вид заполнителя также влияет на соотношение между параметрами неразрушающего контроля и прочностью бетона. Для крупного заполнителя, представляющего собой различные разновидности кварца, влияние этого фактора незначительно. Однако для заполнителя, который сильно отличается от этого типа, такое влияние может существовать. Для иллюстрации сказанного рассмотрим бетон с баритовым заполнителем ( $BaSO_4$ ). Этот заполнитель характеризуется пониженной скоростью распространения 3800—4000 м/с по сравнению с кварцем, скорость распространения у которого 5600—5800 м/с и прочностью при сжатии около 600 кгс/см<sup>2</sup>.

Результаты, полученные при испытании бетона на речном кварцевом гравии, баритовом и смешанном, приведены на рис. 7.10 с использованием системы кривых равной прочности. Мы видим, что по мере повышения про-

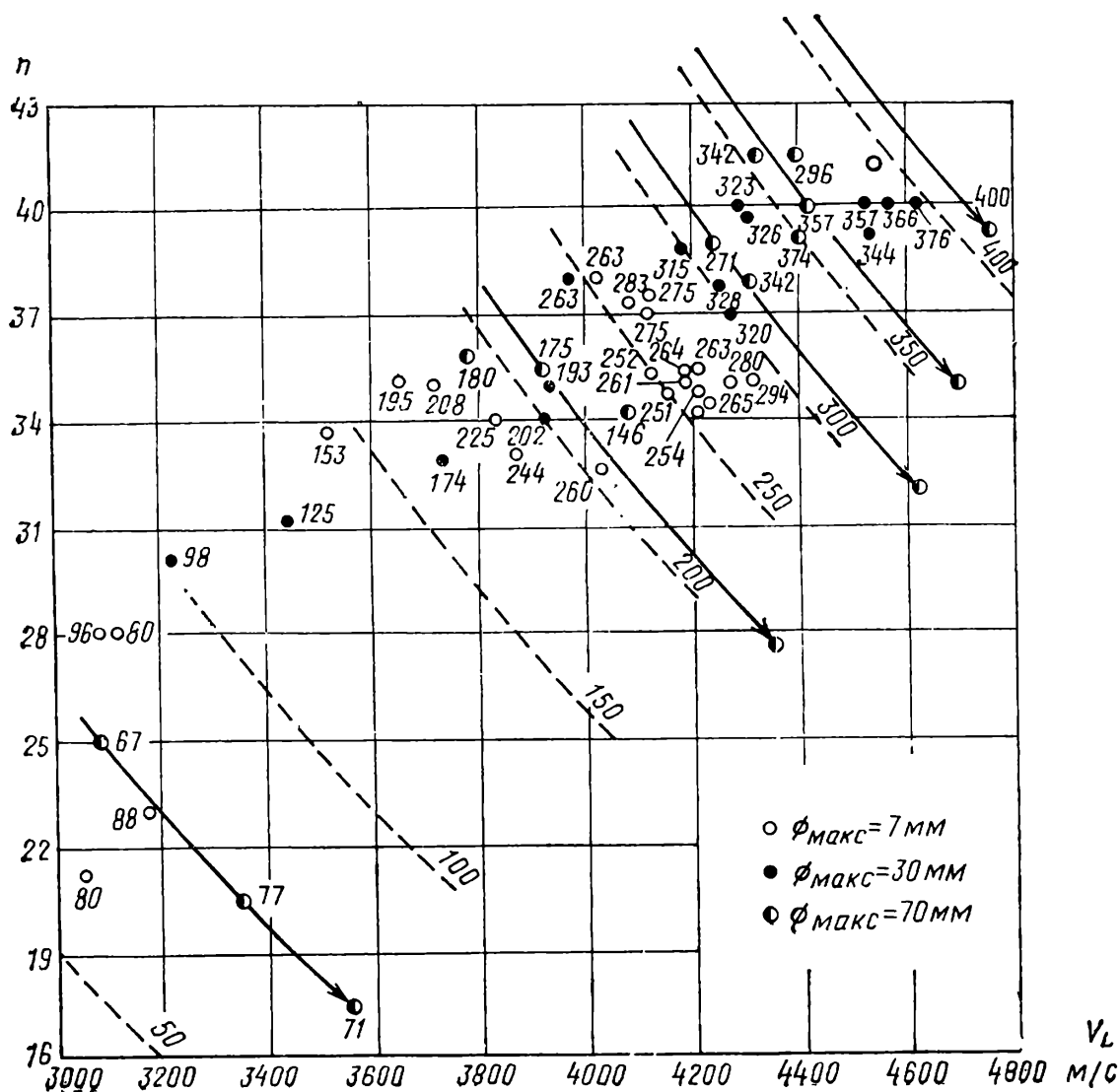


Рис. 7.9. Влияние максимальных размеров заполнителя в комбинированных методах,  $V_L - n$

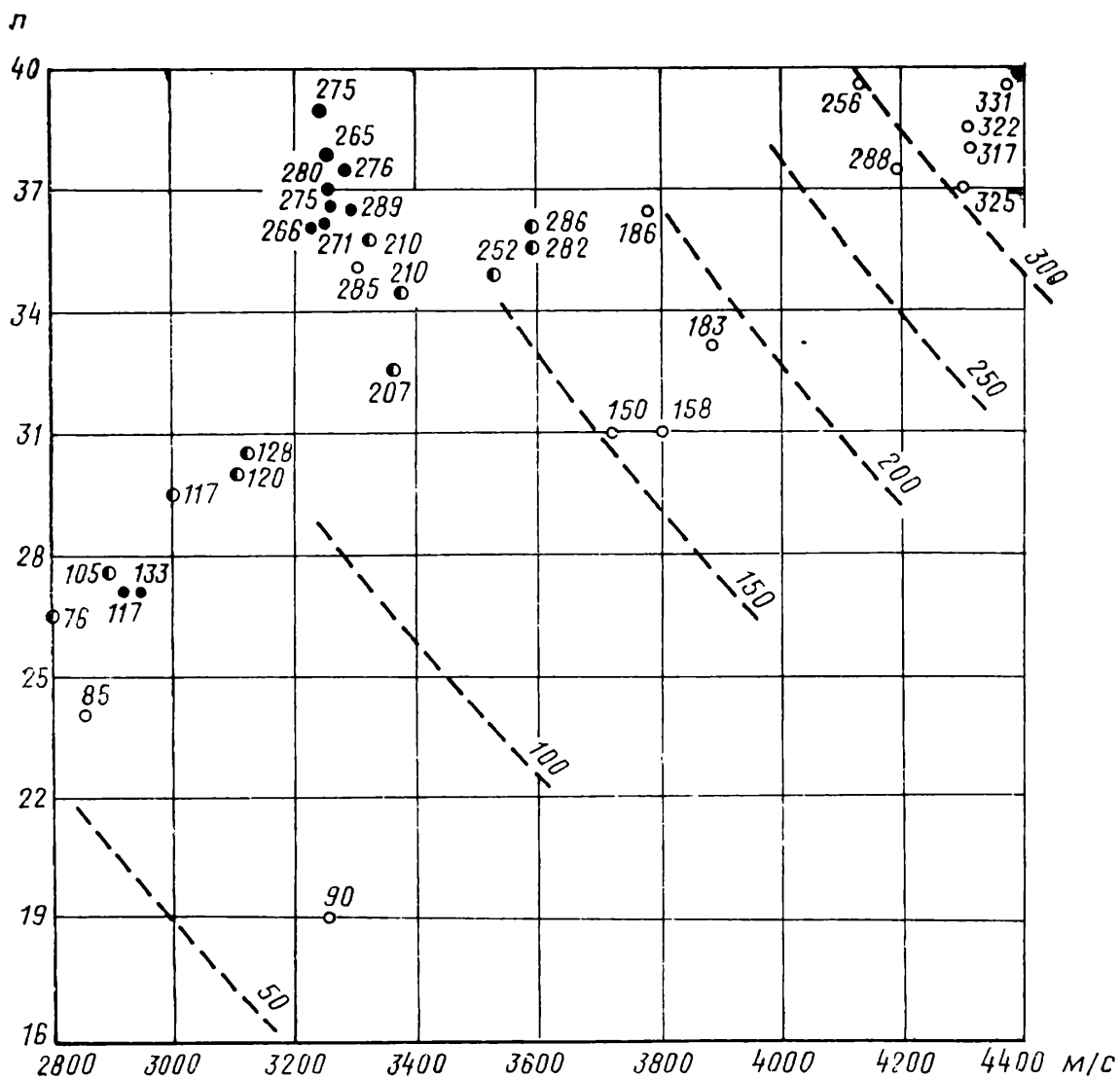


Рис. 7.10. Влияние вида заполнителя в комбинированных методах,  $V_L - n$   
 ○ — речной заполнитель; ● — заполнитель баритовый; ◐ — заполнитель смешанный: 0–3 мм речной (30%), 3–30 мм баритовый (70%)

центного содержания баритового заполнителя увеличиваются значения прочности, соответствующие одним и тем же значениям параметров неразрушающих испытаний. Таким образом, при испытании бетонов на различных заполнителях получены следующие значения отношения  $R_{ef}/R_{st}$ , где  $R_{st}$  — прочность стандартного бетона, приготовленного на речном кварцевом гравии:

бетон на смешанном заполнителе	· · · · ·	1,58
» » баритовом »	· · · · ·	1,9

На основе этих данных можно составить уравнение в общем виде, обозначив через  $C_a$  отношение  $R_{ef}/R_{st}$ :

$$C_a = 1 + 0,9p, \quad (7.20)$$

где  $p$  — процентное содержание баритового заполнителя в объеме заполнителя.

Также были выполнены испытания бетона на керамзитовом заполнителе. Результаты испытаний показали, что происхождение заполнителя не

влияет в этом случае на соотношение между параметрами комбинированного метода и прочностью бетона. Это открывает хорошие перспективы для применения комбинированного неразрушающего метода контроля качества бетона на легком керамзитовом заполнителе.

Точность комбинированного неразрушающего метода [8, 9], подразумеваемая под этим интервал, в котором содержится 90% от результатов неразрушающих испытаний по отношению к таким же разрушающим испытаниям, необходимо особо оговорить, как это предусмотрено в [8.9] для следующих случаев<sup>1</sup>:

1) имеются контрольные образцы, условия твердения, возраст и состав бетона которых известны. Полученные расчетные и экспериментальные данные дают

точность  $\pm 10-12\%$ ;

2) имеются контрольные образцы, но состав бетона неизвестен: точность  $\pm 12-18\%$ ;

3) состав бетона известен, но отсутствуют контрольные образцы: точность  $\pm 18-25\%$ ;

4) нет контрольных образцов и не известны остальные факторы, но есть общая зависимость  $v_L - n$  для стандартного бетона: точность  $\pm 20-30\%$ .

**7.3.3. Применение на строительстве.** Несмотря на то что метод, изложенный в п. 7.3, разработан сравнительно недавно (1966 г.), известно о быстром его внедрении в практику контроля качества бетона в строительстве благодаря гибкости и точности, которую он обеспечивает. В настоящее время условия на месте испытаний всегда позволяют уточнить необходимые факторы, влияющие на прочность бетона в процессе производства работ.

Ниже приводятся результаты, полученные в INCERC при сопоставлении данного метода с другими на нескольких строительных площадках в Румынии [7].

1. На строительстве промышленного цеха, для которого были изготовлены фермы из бетона марки 250 и колонны из бетона марки 300, прочность, полученная на кубах, составляла  $R = 130 \div 150 \text{ кгс/см}^2$ . Возникает вопрос, имел ли бетон такую прочность в процессе укладки. На строительной площадке имелись кубы, которые были испытаны тремя видами неразрушающих испытаний: ультразвуковым, склерометрическим и комбинированным, а затем разрушающим на прессе. Результаты сравнительных испытаний кубов представлены в табл. 7.1.

Данные этой таблицы показывают, что наименьшие ошибки получают при проведении испытаний комбинированным методом.

Испытания, выполненные на колоннах и фермах с помощью комбинированного метода, показали:

для колонн	I партии	. . . . .	прочность	145—150	кгс/см <sup>2</sup>
»	»	II	»	. . . . .	» 180—220
»	»	III	»	. . . . .	» 200—280
для ферм		. . . . .	»	140—160	»

<sup>1</sup> В каждом случае используются графики  $v_L - n$ , построенные для «стандартного» бетона, т. е. такого, у которого поправочные коэффициенты равны единице (прим. науч. ред.).

2. Другая серия испытаний была выполнена при укладке бетона в блок, включающий стены подвала, где испытания на кубах показали прочность  $R = 50 \div 60 \text{ кгс/см}^2$  по отношению к проектной марке 150; и в этом случае на строительной площадке находились готовые кубы, которые были испытаны с помощью трех неразрушающих методов, упомянутых выше; результаты испытаний приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.1. Испытание кубов на строительстве промышленного цеха

№ кубов	$R$ , прессом в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , комбинированный в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , ультразвуком в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , склерометром в $\text{кгс/см}^2$	$\epsilon$ , комбинированный в %	$\epsilon$ , ультразвуком в %	$\epsilon$ , склерометром в %
1	142	150	195	143	+ 5	+28	+ 1
2	163	175	220	200	+ 7	+26	+22
3	151	136	182	178	-10	+20	+18

Испытания, выполненные на бетоне стен подвала комбинированным методом, показали, что прочность его была в пределах 75—105  $\text{кгс/см}^2$ .

3. Другая серия испытаний была выполнена на экспериментальных конструкциях, в которых был предусмотрен бетон проектной марки 200, а испытанные на прессе бетонные кубы показали прочность 300, но по своему внешнему виду не соответствовали тому бетону, который укладывался в конструкцию: имелись зоны с большой пористостью, было видно расслаивание бетона и пр. В этом случае также сохранились кубы, результаты испытаний которых приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.2. Испытание кубов при возведении стен подвала

№ кубов	$R$ , прессом в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , комбинированный в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , ультразвуком в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , склерометром в $\text{кгс/см}^2$	$\epsilon$ , комбинированный в %	$\epsilon$ , ультразвуком в %	$\epsilon$ , склерометром в %
1	85	104	127	141	+18	+35	+40
2	74	80	115	106	+ 8	+35	+30

Таблица 7.3. Испытание опытных составов (кубов)

№ кубов	$R$ , прессом в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , комбинированный в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , ультразвуком в $\text{кгс/см}^2$	$R$ , склерометром в $\text{кгс/см}^2$	$\epsilon$ , комбинированный в %	$\epsilon$ , ультразвуком в %	$\epsilon$ , склерометром в %
1	294	256	250	228	-14	-15	-2
2	338	290	280	310	-14	-17	-9

Неразрушающие испытания, проведенные на кубах, показали меньшую прочность, чем измеренная на прессе; наименьшие ошибки, полученные во время испытаний, относились к склерометрическому методу. Такое положение является необычным и на нашло объяснения. Затем были испытаны

две колонны с помощью трех неразрушающих методов с использованием коэффициентов влияния, предусмотренных в главах 2, 4 и 7, и с учетом результатов, полученных на кубах.

Полученные результаты хорошо согласуются по всем трем методам и четко выделяют зону с местными дефектами методом ультразвука и комбинированным. В сечении без дефектов прочность бетона находилась между 140 и 180 кгс/см<sup>2</sup>.

Большая разница между результатами, полученными на кубах и в конструкции, объясняется ошибками в определении прочности ультразвуковым методом или даже комбинированным, полученными на кубах благодаря применению повышенного расхода цемента.

4. Испытания, выполненные на балках и плитах в здании туристской гостиницы, позволили провести сравнение результатов, полученных на кернах диаметром 12 см как неразрушающими, так и разрушающими методами. Полученные результаты приведены в табл. 7.4. В этом случае подчеркивается большая точность, полученная комбинированным и ультразвуковым методами, по сравнению с методом поверхностной твердости.

Таблица 7.4. Испытание перекрытия в здании гостиницы

№ кубов	R, прес-сом в кгс/см <sup>2</sup>	R, комбинированный в кгс/см <sup>2</sup>	R, ультразвуком в кгс/см <sup>2</sup>	R, склерометром в кгс/см <sup>2</sup>	ε, комбинированный в %	ε, ультразвуком в %	ε, склерометром в %
1	60	58	62	89	-3	+3	+48
2	57	51	48	98	-10	-16	+80
3	88	80	86	98	-9	-2	+11
4	71	58	57	98	-18	-20	+38
5	87	80	82	108	-8	-6	+24

На основании этих испытаний можно сделать вывод, что прочность бетона в балках находилась в пределах 60—90 кгс/см<sup>2</sup> по отношению к проектной марке 140.

Результаты, приведенные в предыдущих примерах для пониженной марки бетона ( $\leq 100$ ) и средней ( $100 < R < 300$ ), обработаны статистическим методом. На рис. 7.11—7.13 приведены кривые распределения ошибок при определении прочности различными методами для бетонов средних марок.

Из рис. 7.11—7.13 видно, что для бетонов низких и средних марок неразрушающий комбинированный метод является более надежным, чем взятые отдельно ультразвуковой импульсный и метод поверхностной твердости. Для бетонов высоких марок в следующем параграфе рассматриваются два других метода.

**7.3.4. Применение контроля в сборных элементах.** В этом параграфе приводятся сравнительные результаты, полученные различными неразрушающими методами контроля качества сборных элементов. Испытанные элементы характеризуются, как правило, повышенными марками бетона.

1. Первая серия испытаний была выполнена на ребристых плитах длиной 2 м, толщиной 7 см. Проектная марки бетона была 500.

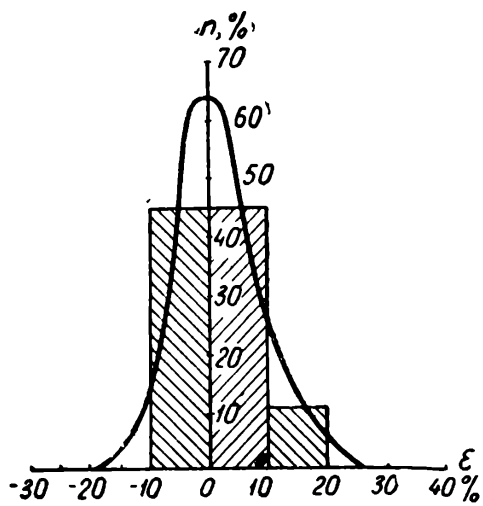


Рис. 7.11. Кривая распределения ошибок в комбинированном методе ( $110 < B < 300$ )

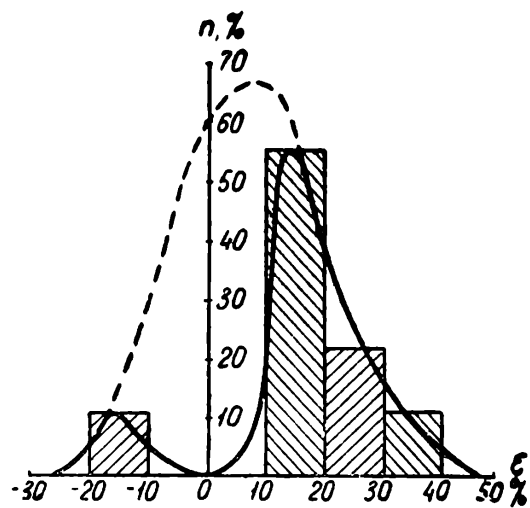


Рис. 7.12. Кривая распределения ошибок в ультразвуковом методе ( $110 < B < 300$ )

Из небольшого количества плит были извлечены керны в тех местах, которые были предварительно испытаны неразрушающим способом. Сравнительные результаты, полученные на прессе и неразрушающими испытаниями, приведены в табл. 7.5.

Отмечается большая точность комбинированного неразрушающего метода по сравнению с другими неразрушающими методами.

Неразрушающие испытания, выполненные непрерывно на большой серии плит в количестве 30 элементов, показали, что прочность их находилась в пределах 374 — 445 кгс/см<sup>2</sup>.

2. Другая серия испытаний была выполнена на бетонных тубингах длиной 60 см и толщиной 25 см; проектная марка бетона 300.

Было проведено испытание небольшого количества тубингов, специально отобранных на основе неразрушающих испытаний, из которых затем были извлечены керны. Результаты разрушающих испытаний, полученные на кернах, приводятся параллельно с данными, полученными неразрушающими испытаниями тубингов в тех местах, из которых были извлечены керны, и даны в табл. 7.6.

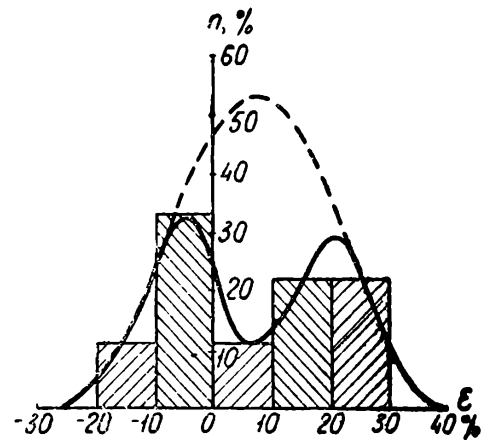


Рис. 7.13. Кривая распределения ошибок в склерометрическом методе ( $100 < B < 300$ )

Таблица 7.5. Испытания кернов, взятых из ребристых плит

№ кубов	$R$ , прес-сом в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , комби-нирован-ный в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , ультра-звуком в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , склеро-метром в кгс/см <sup>2</sup>	$\epsilon$ , комби-нирован-ный в %	$\epsilon$ , ультра-звуком в %	$\epsilon$ , склеро-метром в %
1	412	443	520	543	+7	+21	+24
2	418	433	482	546	+3	+13	+23
3	358	421	434	557	+17	+18	+30

Таблица 7.6. Испытания кернов, взятых из тубингов

№ кубов	$R$ , прес-сом в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , комби-нирован-ный в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , ультра-звуком в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , скле-рометром в кгс/см <sup>2</sup>	$\epsilon$ , комби-нирован-ный в %	$\epsilon$ , ультра-звуком в %	$\epsilon$ , склери-метром в %
1	250	276	280	292	+10	+12	+17
2	75	72	93	104	-4	+24	+39
3	185	206	245	238	+11	+32	+29

Проведенными испытаниями выявили повышенную неоднородность изделий по качеству.

3. Большая серия испытаний, выполненных в INCERC [10], посвящена контролю качества бетона, уложенного в предварительно-напряженные балки большого пролета, армированные прядями. Проектная марка бетона 500.

В табл. 7.7. приведены результаты, полученные на контрольных образцах и кернах, на которых был определен общий конструктивный коэффициент, применяемый в расчетах.

Таблица 7.7. Испытание кубов и кернов из бетона предварительно-напряженных балок

Образец	$R$ , прес-сом в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , комби-нирован-ный в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , ультра-звуком в кгс/см <sup>2</sup>	$R$ , склери-метром в кгс/см <sup>2</sup>	$\epsilon$ , комби-нирован-ный в %	$\epsilon$ , ультра-звуком в %	$\epsilon$ , склери-метром в %
Куб 1	603	534	443	640	-11	-26	+6
» 2	554	526	447	620	-5	-14	+12
» 3	414	418	415	490	+1	0	+18
» 4	422	436	382	560	+3	-9	+30
» 5	597	566	564	620	-5	-6	+4
» 6	599	580	522	675	-3	-13	+18
Керн 1	442	423	391	506	-4	-11	+14
» 2	454	448	414	506	-2	-9	+11

Данные испытаний, приведенные в таблице, показали, что как на кубах, так и в кернах имеются очень большие отклонения по прочности, определенной неразрушающими методами по сравнению с полученной на прессе. Массовые испытания на преднапряженных элементах показали, что использование комбинированного метода на элементах является допустимым в сжатой части верхнего пояса и в средней части балок. В растянутой зоне у торцов и в середине балки вблизи растянутой зоны рекомендуется применение ультразвукового импульсного метода. Изменения прочности в балке приведены на рис. 7.14.

Результаты, полученные на сборных элементах различными неразрушающими методами, были обработаны статистическим методом. На рис. 7.15—7.17 приведены кривые распределения ошибок, полученные с

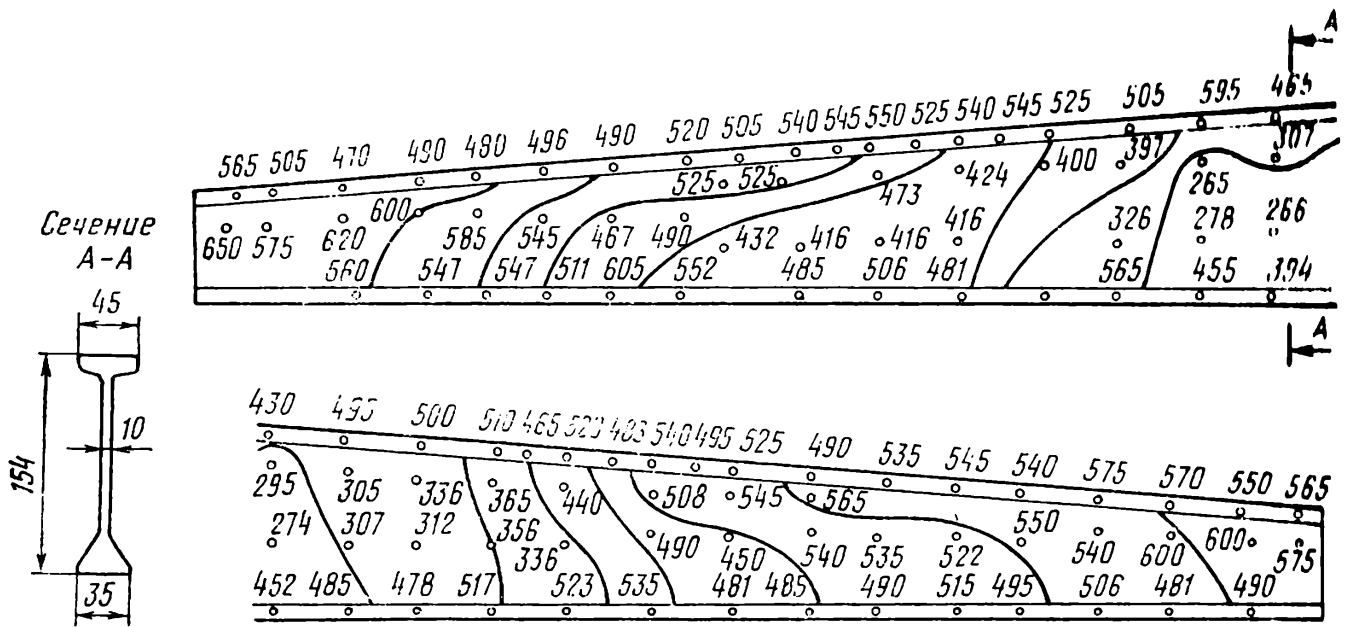
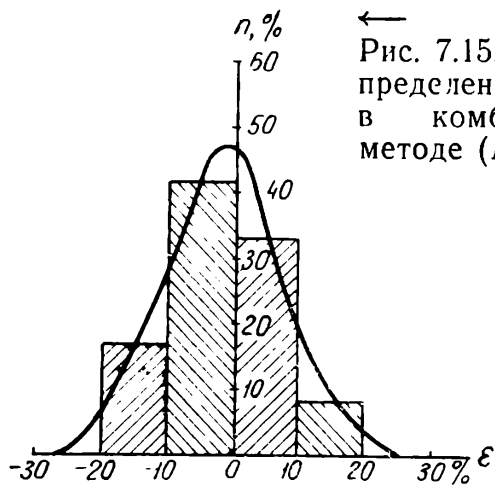


Рис. 7.14. Предварительно-напряженная балка пролетом 24 м



←  
Рис. 7.15. Кривая распределения ошибок в комбинированном методе ( $B \geq 300$ )

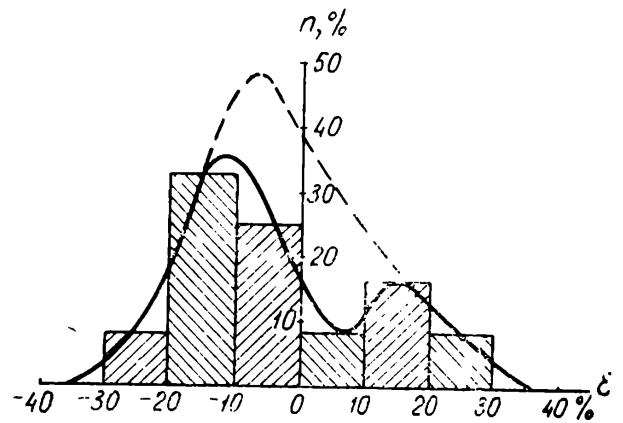


Рис. 7.16. Кривая распределения ошибок в ультразвуковом методе ( $B \geq 300$ )

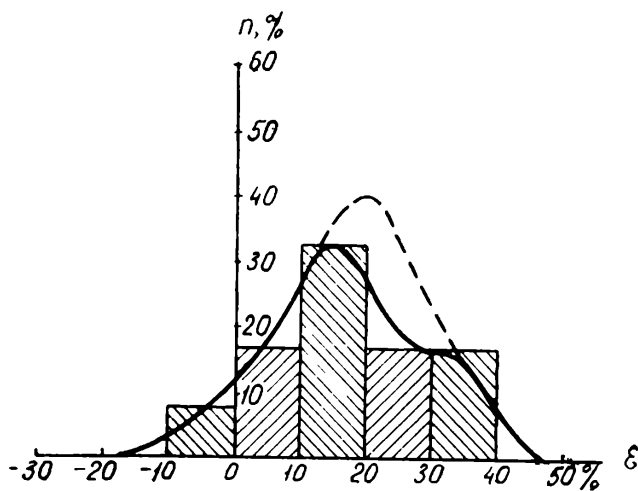


Рис. 7.17. Кривая распределения ошибок в склерометрическом методе ( $B \geq 300$ )



помощью трех неразрушающих методов испытания по сравнению с разрушающими испытаниями на бетонах высоких марок ( $R 300$ ).

Наименьшие отклонения оказались в комбинированном методе, затем следует метод поверхностной твердости и ультразвуковой импульсный метод.

#### 7.4. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД: СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА — ПОВЕРХНОСТНАЯ ТВЕРДОСТЬ

**Метод Шлахты — Брунарского.** Еще в 1958 г. [11] Шлахта понимал, что комбинацией между измерениями твердости поверхности и скоростью распространения ультразвука можно повысить эффективность определения прочности бетона. В своих исследованиях им были использованы кроме измерений скорости ультразвука еще и твердость  $T$  по прибору Польди — Вайцмана. Отношение между тремя характеристиками может быть написано в общей форме:

$$R_c = f(v_L T). \quad (7.21)$$

Выражение (7.21) может быть сведено к частному виду:

$$R_c = f(v_L^2 T). \quad (7.22)$$

Зависимость  $R_c — v_L^2 T$ , определяемая экспериментальным путем, выражается в виде многочлена

$$R_c = 0,0000284 (v_L^2 T)^2 + 0,264 (v_L^2 T) - 7, \quad (7.23)$$

где  $v_L$  выражается в  $км/с$  и  $T$  — в  $кгс/мм^2$ .

Брунарский [12] использовал эту идею и развил ее в двух направлениях. Он отказался от принятой комбинации  $v_L$  и  $T$  и принял более простую зависимость, используя дробную степень. Такая комбинация, по Брунарскому, выражается так:

$$R_c = 0,143 v_L^{2,57} T^{0,92}. \quad (7.24)$$

Вместо прибора Польди — Вайцмана может быть использован склерометр Шмидта. Применяя с этой целью склерометр типа L и проводя дополнительно измерение скорости распространения ультразвука  $v_L$ , получают формулы для  $R_c$ :

$$R_c = 0,022 v_L^{2,63} n_L^{1,44}, \quad (7.25)$$

в котором  $v_L$  выражается в  $км/с$  и  $n_L$  — в делениях для того, чтобы  $R_c$  получить в  $кгс/см^2$ . Выражение (7.25) воспроизведено на рис. 7.18 в такой форме, которая облегчает вычисления. Автор показал, что метод приводит к уменьшению ошибки с  $\pm 33\%$  до  $\pm 25\%$  по отношению к обычному методу.

Рис. 7.18. Зависимость  $R=F(V_L, n_L)$  (по Брунарскому)

$R, \text{кгс/см}^2$

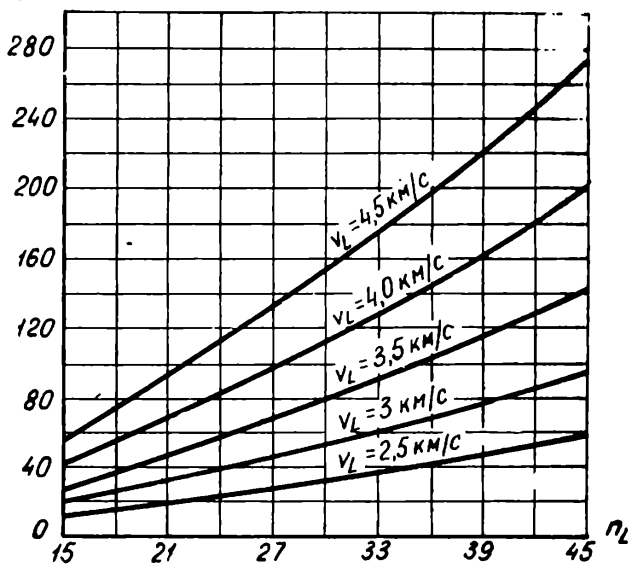
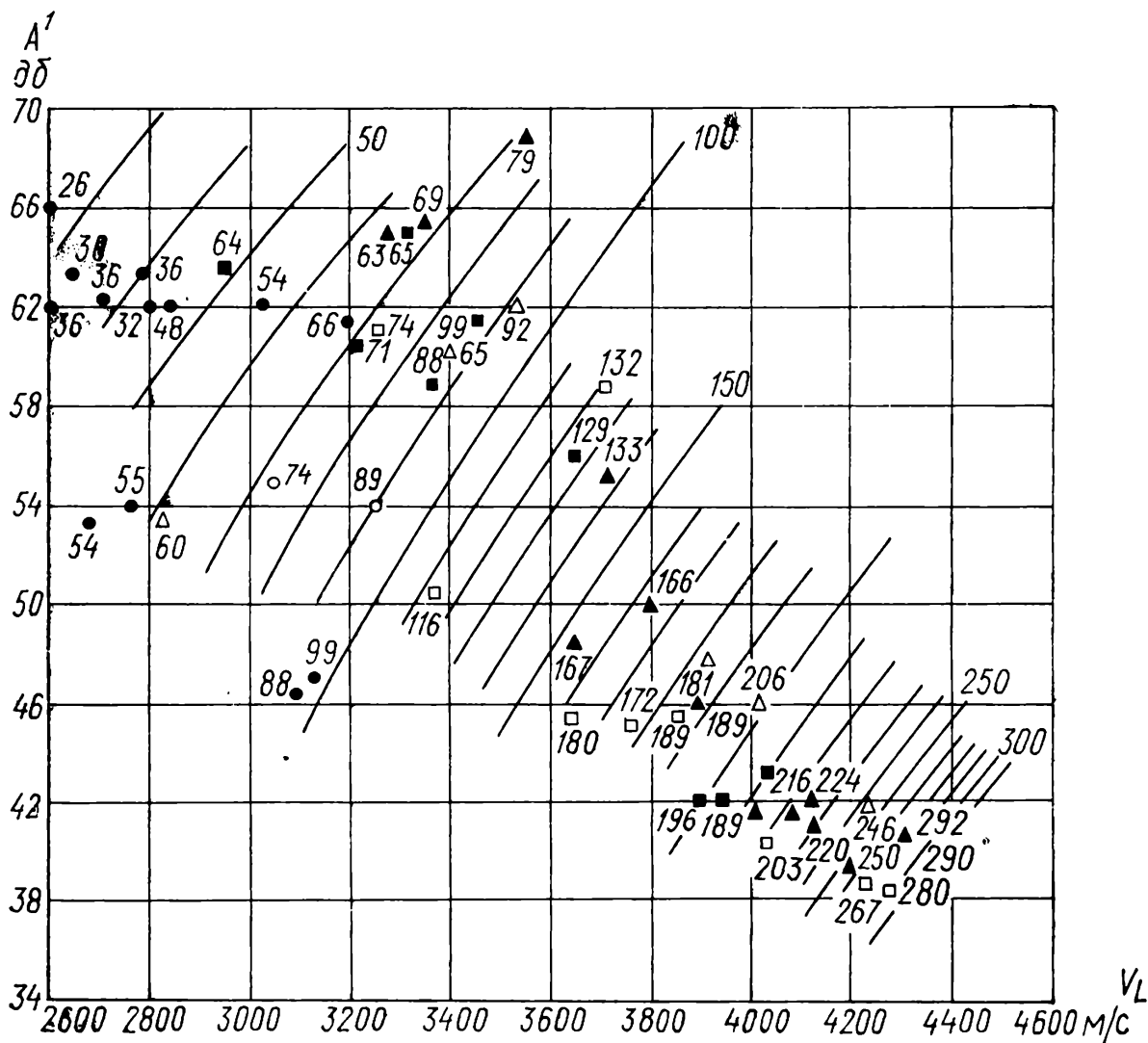


Рис. 7.19. Влияние мелких фракций заполнителя в комбинированном методе  $V_L-A'$

○ — мелкий заполнитель (45%), хранение 28 сут.; □ — средний заполнитель (20%), 28 сут.; △ — крупный заполнитель (6%), 28 сут.; ● — мелкий заполнитель (40%), 7 сут.; ■ — средний заполнитель (20%), 7 сут.; ▲ — крупный заполнитель (6%), 7 сут.:



## 7.5. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД: СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ — ЗАТУХАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА

### 7.5.1. Комбинированный метод: скорость распространения — затухание переднего фронта волны

Такая комбинация была опробована потому, что изменение зернового состава по-разному действует на скорость распространения и затухание ультразвука. Измерения были выполнены на кубах со стороной 20 см, но отсутствие методики учета потерь на пути импульса от излучателя к бетону и от бетона к приемнику делает невозможным переход от образца к элементам любой толщины<sup>1</sup>.

Результаты испытаний на бетонах различной плотности, содержащих заполнитель мелких фракций (0—1 мм) между 6% и 45% от полного объема заполнителя, проведенных в возрасте 7 и 28 дней, представлены на рис. 7.19. С помощью экспериментальных данных на график нанесена система кривых

<sup>1</sup> Неопределенность на контакте «преобразователь — бетон» может быть исключена за счет повышения трудоемкости испытаний. Например, путем построения амплитудных годографов (примеч. науч. ред.).

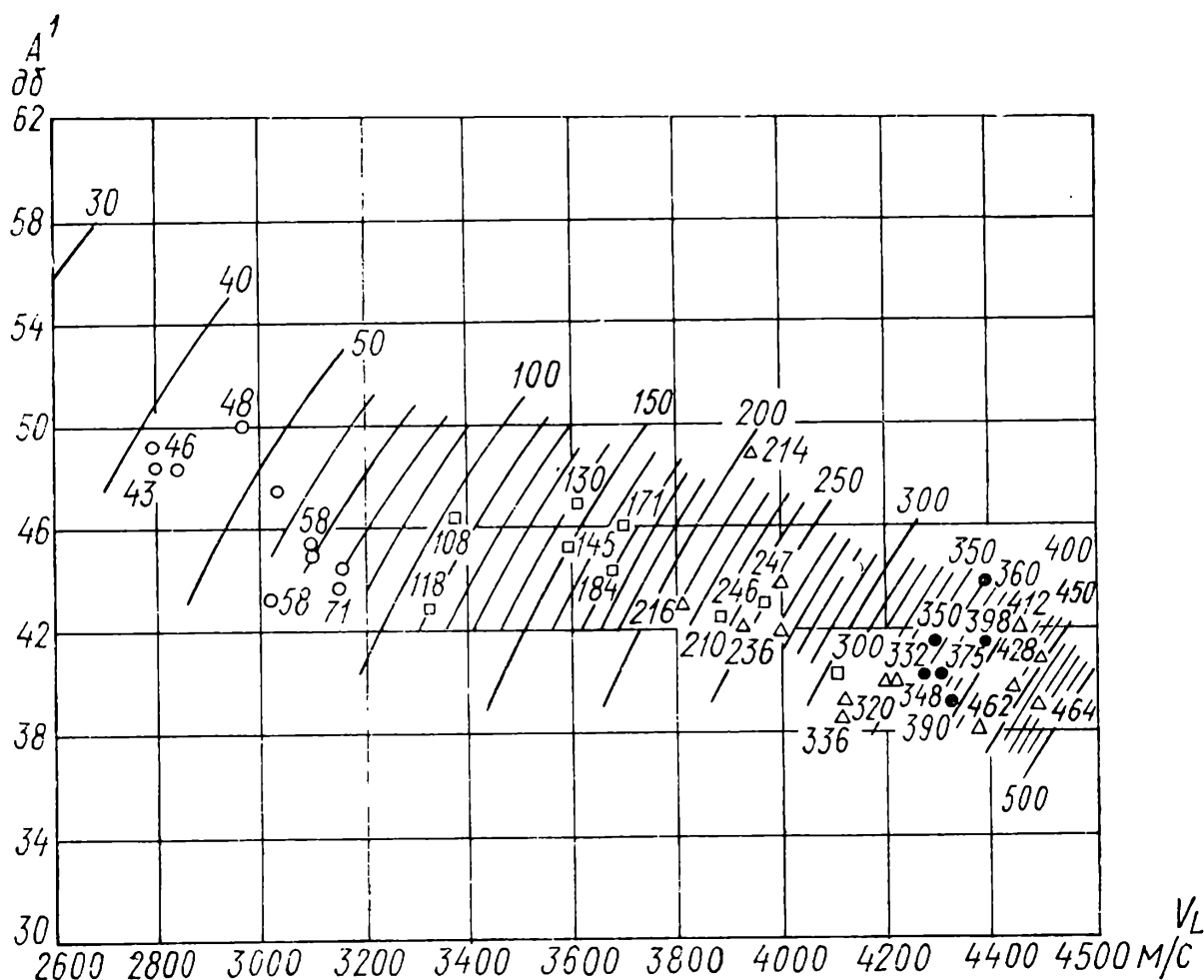


Рис. 7.20. Влияние максимальных размеров заполнителя в комбинированном методе,  $V_L - A'$

○ — заполнитель размером, максимум 1 мм, □ — то же, 7 мм; △ — то же, 30 мм; ● — то же, 70 мм

равной прочности. Мы видим, что эти кривые в области высокой прочности сближаются, чем подчеркивается тот факт, что метод наиболее пригоден для бетонов с низкой и средней прочностью.

Аналогичные исследования были выполнены на бетонах с разным максимальным диаметром заполнителя в пределах 1—70 мм. Экспериментальные результаты, приведенные на рис. 7.20, показывают, что и в этом случае комбинированный метод «скорость распространения — затухание ультразвука»<sup>1</sup> является эффективным. Рассмотрение кривых равной прочности показывает, что в выполненных измерениях скорость ультразвука является более чувствительной к изменениям прочности, чем затухание. Можно заключить, что в случаях, в которых изменение прочности бетона вызвано различием в уплотнении или же изменением зернового состава, комбинацию «скорость ультразвука — затухание» следует считать пригодной. Этот метод непригоден для случаев, в которых имеются неконтролируемые изменения вида и главным образом расхода цемента.

### 7.5.2. Комбинированный метод: скорость распространения — коэффициент затухания ультразвука

Применение комбинации измерений скорости распространения и коэффициента затухания ультразвука методом многократного отражения для определения прочности бетона было начато в 1961 г. коллективом сотрудников Академии наук ЛатвССР в Риге [17], которые провели соответствующие измерения коэффициента затухания (см. п. 2.4.5.2).

В 1962 г. Мартинчек [18] продолжил эти исследования с использованием аппарата RECO и показал, что для определения прочности бетона можно использовать выражение:

$$R_c = kv_L^4 \alpha_*^{-0,5}, \quad (7.26)$$

в котором коэффициент  $k$  определяется при последовательных испытаниях по истечении 24 ч после приготовления, выполненных параллельно неразрушающим ( $v_L, \alpha_*$ ) и разрушающим ( $R$ ) методами.

Галан (15) в 1966 г. показал, что для определения прочности бетона можно применить более общее выражение:

$$R_c = av_L^b \alpha_*^{-c}. \quad (7.27)$$

Оно не зависит от возраста и влажности бетона, но в него входят коэффициенты  $a, b$  и  $c$ , которые учитывают состав бетона. Применяя бетоны разных составов, Галан установил следующие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} a &= 0,05 - 0,24; \\ b &= 4 - 4,92; \\ c &= 0,43 - 0,88: \end{aligned} \quad (7.28)$$

<sup>1</sup> Имеется в виду снижение амплитуды переднего фронта продольной волны, проходящей через бетон, по сравнению с эталоном (см. п. 2.4.5) (примеч. науч. ред.).

Коэффициенты из (7.28) соответствуют  $v_L$ , выраженной в км/сек, и  $\alpha$  — в  $1/100$  мс; таким образом  $R$ , согласно формуле (7.27), выражается в  $кгс/см^2$ . Метод не может быть рекомендован для применения на строительстве, когда требуется провести контроль качества бетона неизвестного состава. Наоборот, метод эффективен для контроля нарастания прочности в процессе твердения бетона известного состава.

### 7.6. КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД: СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА — ПОГЛОЩЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Комбинированный метод «скорость ультразвука — коэффициент ослабления гамма-излучения» используется в Румынии [7]; он аналогичен другим комбинированным методам, также разработанным в Румынии. Для графического построения наносят в прямоугольных координатах на оси абсцисс скорость ультразвука, а на оси ординат линейный коэффициент ослабления гамма-излучения. На основе большого количества образцов, испытанных как неразрушающими, так и разрушающими методами, наносят кривые равной прочности, определяющие состав испытываемого бетона. Для получения семейства характерных кривых необходимо, чтобы образцы имели заметную разницу в составах и различную степень уплотнения. Этот комбинированный метод рекомендуется применять в случаях, когда прочность зависит от степени уплотнения бетона и предполагается существование скрытых дефектов.

Семейство кривых равной прочности показано на рис. 7.21. Кривые были получены на основании экспериментов с бетоном, приготовленным на цементе PZ400 с расходом его  $350 кг/м^3$ ; применялся обычный кварцевый заполнитель с максимальным размером  $30 мм$ . В качестве источника излучения был принят кобальт-60. По оси ординат наносится линейный коэффициент ослабления  $\mu [см^{-1}]$  и объемная масса бетона.

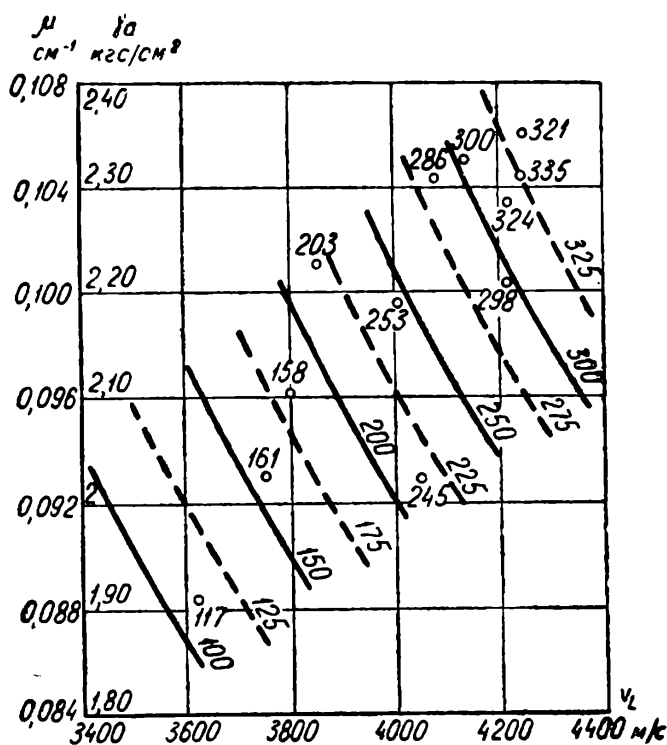


Рис. 7.21. Кривые равной прочности в комбинированном методе,  $V_L$ — $\mu$

Кривые равной прочности, вычерченные с интервалом  $25 кгс/см^2$ , охватывают диапазон прочностей от  $100$  до  $325 кгс/см^2$ . Наклон кривых больше  $45^\circ$ , что демонстрирует большее значение скорости распространения ультразвука, чем коэффициента линейного ослабления  $\gamma$ -излучения в установлении прочности бетона.

По этому методу предполагается вывод кривых равной прочности для применяемого состава бетона при постоянных условиях твердения, возрасте и влажности бетона.

### 7.6.1. Комбинированный аналитический метод: скорость распространения ультразвука — коэффициент ослабления гамма-излучения

Аналитический метод был предложен Брунарским в Польше [12,20]\*, который пришел к выводу, что для гамма-излучения в бетоне, в котором дозировка цемента изменяется в пределах 150—450 кг/м<sup>3</sup>, может использоваться выражение в общем виде:

$$R = 0,0145v_L^{3,99} \gamma_b^{6,70} \text{ кгс/см}^2, \quad (7.29)$$

где  $v_L$  — скорость распространения продольных волн ультразвука в км/с;  $\gamma_b$  — объемная масса бетона, определяемая с помощью гамма-излучения, в кгс/дм<sup>3</sup>.

По мнению авторов, выражение (7.29) не может быть установлено независимо от расхода и вида цемента, условий твердения, возраста и влажности бетона, а также от таких параметров, как вид и зерновой состав заполнителя. Авторы полагают, что для данного метода возможны ошибки до  $\pm 19\%$ .

### 7.7. СЛОЖНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД

В предыдущем разделе этой главы были проверены парные комбинации простых неразрушающих методов для выражения возможностей комбинированных методов. Отсюда следует, что можно решить вопрос о применении более двух неразрушающих комбинированных методов для определения прочности бетона. По мере увеличения количества этих методов и при целесообразном отборе комбинаций точность определения прочности бетона увеличивается.

Один из путей применения сложных комбинированных методов был указан Б. Г. Скрамтаевым и М. Ю. Лещинским [1].

Относительная точность  $\rho_i$  для любого вида измерений должна быть обратно пропорциональна величине среднеквадратичной ошибки:

$$\rho_i = \frac{1}{\sigma_i^2}. \quad (7.30)$$

В этих условиях прочность бетона, определяемая путем комбинации  $k$  неразрушающих методов, выразится уравнением

$$\bar{R} = \frac{R_1 \frac{1}{\sigma_1^2} + R_2 \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + R_k \frac{1}{\sigma_k^2}}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{1}{\sigma_k^2}} \quad (7.31)$$

\* Работа выполнена совместно с советскими исследователями Р. А. Макаровым и Я. Н. Басиным (примеч. науч. ред.).

и соответствующая среднеквадратичная ошибка будет

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} + \dots + \frac{1}{\sigma_k^2}}} . \quad (7.32)$$

Если неразрушающие методы применяют в комбинации, которые характеризуются одинаковыми квадратичными ошибками, тогда прочность по (7.31) остается в расчетах просто как среднеарифметическая

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_k}{k} \quad (7.33)$$

и среднеквадратичная ошибка дается выражением

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{k}} . \quad (7.34)$$

Существует и другой путь, более приближенный, на основе физических представлений, по которому можно оценить преимущества сложных комбинированных неразрушающих методов в определении прочности бетона. Однако необходимо принять во внимание, что с увеличением количества методов испытания повышается продолжительность необходимых испытаний и уменьшается экономический эффект метода. Между этими двумя тенденциями существует оптимум в получении точности и быстрой информации, в которых эти два существенных признака могут быть по-разному взвешены и приняты во внимание.

## Список литературы к гл. 1

1. M a r t i n c e k G. Die Bestimmung der Elastizitätsmoduln aus Eigenschwingungen von Würfeln und kurzen Prismen. In: *Acustica*, vol. 13, nr. 3, 1963, p. 123—130.
2. H a r r i s C. M. și C r e d e C. E. Șocuri și vibrații (trad. din 1, engleză), București, Editura tehnică, 1968.
3. B a n c r o f t D. *Physical Review.*, 1941, vol. 59, p. 588.
4. P i c k e t t G. *Proceedings of American Society for Testing Materials*, 1945, vol. 45, p. 856.
5. J o n e s R. *Les essais non-destructifs des betons*, Paris. Ed. Eyrolles, 1967, p. 141—144.
6. B r u n a r s k i L. Recommendation for the use of resonance methods for testing concrete. Part 1., N. D. T. RILEM meeting, Varna, 1968.
7. F ă c ă o a r u I. Studiul Întăririi betoanelor cu cimenturi rapide prin metode sonore. În: *Rev. Ind. Constr. și a Mat. de Constr.*, nr. 12/1957, p. 665—673.
8. F ă c ă o a r u J. și S t ă n c u l e s c u G. Infuența umidității asupra variației modulului de elasticitate dinamic al betoanelor cu cimenturi rapide. În: *Rev. Ind. Constr. și a Mat. de Constr.*, nr. 1/1958, pp. 15—19.
9. F ă c ă o a r u I. Contribuții la studiul Întăririi betonului prin metode ultrasonice (teză de dizertație. Conducător prof. ing. C. N. Avram). Timișoara, 1961.
10. C h e f d e v i l l e J. *Bulletin RILEM*, 1953, nr. 15, p. 61.
11. M c K e n z i e J. K. *Proceedings of Physical Society. Seria B.* vol. 63, nr. 1—2, 1950.
12. K o t t a s H. Über Verfahren zur Bestimmung des dynamischen E- und G-Moduls. Bericht in RILEM Symposium in Stuttgart, 1968.
13. F ă c ă o a r u J. și S t a m a t e G. On the relation between some static and dynamic constante of concrete N. D. T., RILEM meeting, Varna, 1968.
14. T e o d o r u G. și T a t u D. Resultate în apreciera rezistenței betonului la îngheț-dezyheț cu ajutorul metodelor nedestructive. *Communicare seziune. J. C. M. P. C.*, 1969.
15. T e o d o r e s c u D. și H e r d l i c k a A. Mase anticorozive pe bază de furfural-acetonă. În: *Materiale Plastice*, fvol. 4, nr. 4, 1967, p. 190—193.
16. F ă c ă o a r u I. și H e r d l i c k a A. Metode nedestructive comparative pentru urmărirea comportării maselor anticorozive la acțiuni agresive. În: *Rev. Material plastice*, nr. 11, 1971.
17. J o n e s R. și W e l c h G. B. The damping properties of plain concrete: effect of composition and relations witch elasticity and strength. R. R. L. Report LR 111 Crowthorne, 1967.
18. T h o m s o n W. T. *Proceedings of American Society for Testing Materials*, vol. 40, 1940, p. 1113.
19. W i l l i s T. F. and R e u s M. E. *Proceedings of American Society for Testing Materials*, vol. 40, 1940, p. 1113.
20. L o n g B. G., K u r t z H. J. and S a n d e n a w T. A. *Juornal of American Concrete Institute*, vol. 16, 1945, p. 217.
21. L' H e r m i t e R. *Annales de l'institut Technique de Bâtiment.* nr. 140, 1950.
22. C a t h a r i n P. Die Messung der Verformbarkeit von Normen-prismen mit Hilfe des Elastographen. În: *Tonindustrie Zeitung*, vol. 90, nr. 10, 1966, p. 471—476.
23. K e s l e r C. E. and H i g u c h i Y. Determination of compressive strength of concrete by using its sonic properties. În: *Poseedings of American Society for Testing Materials*, vol. 53, 1953, p. 1044—1051.
24. G a t f i e l d E. N. A method of studyingi the effect of vibratory stress, including



- fatigue, on concrete in flexure. Magazine of Concrete Research, vol. 17, nr. 53, 1965, p. 211—216.
25. J. P a q u e t. Etude vibratoire des pieux en béton—Réponse harmonique et impulsionnelle—Application au contrôle. În: Ann. de l'Inst. Techn. du Bât. et des Trav. Pub, vol. 28, nr. 245, Mai, 1968.
  26. K a c h i s B. Utilisation de la méthode à la détermination de l'effort de rupture à la flexion des barres en béton surarmé, du module d'élasticité des prismes en béton et de la contrainte des fils d'aciers. În: Billetín RILEM, nr. 20, 1963, p. 97—98.
  27. J o n e s R., T h r o w e r E. N. Journal of Sound and Vibrations, vol. 2., nr. 3, 1965, p. 238—365.
  28. M u e n o w R. Journal of Portland Cement Association Research and Development Laboratory, 1963, p. 8—21.
  29. F ă c ă o a r u I., T e o d o r e s c u D., H e r d l i c k a H. și S t a m a t e G. Comportarea subsarcină maselor de furfural-acetonă. În: Materiale Plastice, vol. 5, nr. 5, 1968, p. 263—269.
  30. P o h l E. Zerstörungsfreie Prüfmethoden für Beton. Berlin, VEB-Verlag, 1966.
  31. H ö n i g A. și Z a p l e t a l V. Nedestructivní zkušebnictví. Praha, Statní Nakladatelství technické literatury, 1966.

### Список литературы к гл. 2

1. J o n e s R. Non-Destructive Testing of Concrete. Cambridge University Press, 1962.
2. P o h l E. Zerstörungsfreie Prüfmethoden für Beton. Berlin, VEB-Verlag für Bauwesen, 1966.
3. H ö n i g A. și Z a p l e t a l V. Nedestructivní zkušebnictví, Praha, Statní nakladatelství technické literatury, 1966.
4. Ф и р с т о в В. Г., К а ш к и н С. К. и П о ч т о в и к Г. Я. Неразрушающие испытания дорожных конструкций и материалов. М., «Транспорт», 1964.
5. F ă c ă o a r u I., N e g o i ț ă C., B e r n a t h A. Măsurări și control cu ultrasunete, București, Editura tehnică, 1965.
6. J o n e s R. Non-Destructive Testing of Roads and Structures. Inst. of Mun. Eng. and RRL, London, 1965.
7. K o l s k i H. The propagation of longitudinal elastic waves along cylindrical bars, În: Phil. Mag. Rev., vol. 7, nr. 45, 1954, p. 712—726.
8. L' H e r m i t e R. Methode d'auscultation des ouvrages par la détermination de la vitesse du son. Conférence Société de I. C. F. et A. F. P. C., Paris, 1951.
9. D a w a n s e G. Exploitation de la méthode d'auscultation dynamique des ouvrages en béton armé. Congress of Int. Ass. for Bridge and Struct. Eng. Cambridge, London, 1952.
10. R e i d i n g F. J. A battery-operated concrete tester. Comunicare TNO la Sesiunea Comisiei RILEM de la Aachen, 1966.
11. Х а н г а н М., Ф э к о о а р у И. О коэффициенте однородности бетона в расчетах по предельным состояниям. «Бетон и железобетон», № 8, 1962.
12. W i e b e n g a J. G. A comparison between several combined non-destructive testing methods, to derive the compressive strength of concrete. Comunicare TNO la Sesiunea Comisiei RILEM, Varna, 1968.
13. F ă c ă o a r u I. Determinarea rezistenței betonului prin metode nedestructive bazate pe măsurarea atenuării ultrasunetelor. În: Revista Construcțiilor și Materialelor de Construcție nr. 8/1965.
14. K a c h i s B. Ultrasonic testing of concrete. Comunicare ETI la Sesiunea Comisiei RILEM de la Aachen, 1966.
15. J o n e s R. The ultrasonic testing of concrete. În: Ultrasonics, 1963, nr. 1, p. 78—82.
16. J o n e s R. The non-destructive testing of concrete. În: Instrument Review, November, 1966. B r u n a r s k i L. Okreslanie dolnej gramicznej witrazy i wspolczynnik jednorodności betonu metode ultrazwiekowa. Comunicare ITB la a III-a Conferință Națională de Încercări Nedestructive. Warszawa, 1966.
17. B r u n a r s k i L. Comunicare ITB la a III-a Conferința Națională de Încercări Nedestructive. Warszawa, 1966.
18. M a r t i n c e k G. L'influence du nombre de dimensions du milieu pour les essais

- dynamiques d'impulsion. Comunicare CSAV la Sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
19. B a i l i e v G. An attempt to apply the ultrasonic method to the modelling of civil engineering structures and constructions. Comunicare Energoproiect la Sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
  20. M o m m e n s A. Influence du traitement à la vapeur et des conditions de conservation après ôa traitement. Comunicare C. N. R. S. T. I. C. la Sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
  21. E l v e r y R. H., D i n M. M. Ultrasonic inspection of reinforced concrete flexural members. Comunicare la Symposium on non-destructive testing of concrete and timber, London, June, 1969.
  22. R u p p e r t W. Bestimmung der Druckfestigkeit von Beton bekannter Zusammensetzung mit Hilfe von Ultraschallimpulsen. Comunicare la Sesiunea Hochschule für Bauwesen, April, 1969, Leipzig.
  23. G a l a n A. Určenie pevnostných vlasnosti betonu pomocou dwuch akustických charakteristik. Stavebnický časopis XV, 3, Bratislava, 1967.
  24. J o n e s R., F ă c ă o a r u I. An analysis of answers to al questionnaire on the ultrasonic pulse technique. În: matériaux et Constructions, vol. 1, nr. 5, Sept., Okt., 1968, p. 457.
  25. J o n e s R., F ă c ă o a r u I. și G a t f i e l d E. N. A comparison of two techniques for measuring the transit time of an ultrasonic pulse through concrete. Comunicare sesiunea Com. Teh. RILEM, Varna, 1968.
  26. F ă c ă o a r u I. Certain problems of ultrasonic pulse propagation in concrete. Comunicare sesiunea Com. Teh. RILEM, Varna, 1968.
  27. J o n e s R., F ă c ă o a r u I. Recommendations for testing control by the ultrasonic pulse method. În: Matériaux et Constructions vol. 2, nr. 10, Paris, 1969.
  28. F ă c ă o a r u I. Studiul Întăririi betoanelor cu cimenturi rapide prin metode sonice. În: Rev. Constr. și Mat. de Constr., nr. 12/1957.
  29. F ă c ă o a r u I. Contribuții la studierea prin-metode ultrasonice a întăririi betoanelor. (Teză de dizertație, Conducător științific prof. ing. C. N. Avram). Timișoara, 1960.
  30. F ă c ă o a r u I. The hardening processes of concrete with cement and other binders. Comunicare sesiunea Com. Teh. RILEM, Slough, 1970.
  31. F ă c ă o a r u I., T e o d o r e s k u D. și B l u m M. Influența temperaturii asupra întăririi chiturilor pe bază de silicat de sodiu determinată prin metoda ultrasonică. Rev. Constr. și Mat. de Constr., nr. 11/1968.
  32. D a w a n c e G. Rapport du President (intervention). Réunion de la Commission RILEM pour l'Essai Non-Destructif, Varna, 1968.
  33. F ă c ă o a r u I., S t a m a t e G h. On the relation between some static and dynamic constans of concrete. Comuniacare la Sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
  34. F ă c ă o a r u I. Probleme speciale în cercetarea lucrărilor de beton armat cu ajutorul ultrasunetelor. Rev. Constr. și Mat. de Constr., nr. 5/1960.
  35. T e o d o r e s c u D., P i p e r a G., S t a m a t e G h. și F ă c ă o a r u I. Cercetări privind comportarea mortarelor de ciment cu adaos de latex de cauciuc în medii acide diluate. Rev. Constr. și Mat. de Constr., nr. 7/1969.
  36. B l u m M., H e r d l i c k a A., T e o d o r e s k u D., F ă c ă o a r u I. și S t a m a t e G h. Chituri și pelicule de protecție anticorosivă. Referat. INCERC, 1968.
  37. V a s i l i u A., T e o d o r e s c u D. și F ă c ă o a r u I. Comportarea cementurilor indigene în ape agresive cu conținut ridicat de CO<sub>2</sub>. Referat INCERC, 1969.
  38. F ă c ă o a r u I. Aspects of the microcracking and failure of concrete under compression determined by means of ultrasonic pulse measurements. Comunicare la Sesiunea Comisiei RYLEM de la Aachen, 1966.
  39. F ă c ă o a r u I., S t ă n c u l e s c u G. and T a n n e n b a u m M. Studies on the determination and crackind of concrete under uniaxial stress fienolds. Conference on Concrete and other Building Materials. Southampton, 1969.
  40. \*\*\* Instrucțiuni tehnice pentru încercarea betonului cu ultrasunete: În: Buletinul Ministerului Construcțiilor Industriale-INCERC, 1971.

41. F ă c ă o a r u I., T e o d o r u G., B u b u i a c L. Recherches sur l'utilisation des mesurages d'atténuation des ultrasons pour la détermination de la résistance de béton. Comunicare INCERC la sesiunea Grupei RILEM de la Bucuresti, 1964.
42. P a q u e t J. Etude vibratoire des pieux en béton-reponse harmonique et impulsionnelle. Application au controle. Ann. de l'Inst. du Bat. et des Trav. Pub., nr. 245, Mai 1968, p. 794.
43. F r e i e s l e b e n H a n s e n P., J e s s i n g J., M ö n s t e d K. and T r u d s ö E. Physical and chemical properties of cement mortar cured at elevated temperatures. Comunicare Sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
44. E l v e r y R. C. Strength of reinforced concrete beams in relation to ultrasonic pulse measurements. Comunicare Univ. College la sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
45. T e o d o r u G. Influence of hydro-thermal treatment applied to concrete on the correlation between longitudinal pulse velocity and compressive strength. Comunicare INCERC la sesiunea Comisiei RILEM, de la Varna, 1968.
46. P e t r o v V. An investigation on the effect of some factors on the relationship between the strength of concrete and the ultrasonic pulse velocity. Comunicare NISI la sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
47. P o p o v A. Détermination du module d'élasticité et du coefficient Poisson pour les granits de diverses qualités à l'aide des ultrasons. Comunicare Energoproiect la Sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
48. I a v o r T. Zerstörungsfreie Güteüberwachung von im Freivorbauverfahren errichteten Brücken. Wiss. Zeit. Leipzig, Heft 1/2, 1966.
49. J o n e s R. A review of the non-destructive testing of concrete. Comunicare la Symposium on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber, Inst. of Civ. Eng. London, 1969.
50. P o h l E. Einschätzung der zerstörungsfreie Prüf- und Messtechnik für Beton in Bauwesen der DDR. Comunicare la Sesiunea Zerstörungsfreie Prüf- und Messtechnik für Beton und Stahlbeton. Leipzig, 1969.
51. S z u k G. Setting and Hardening of Hydraulic Materials. Ac. Teh. Acad. Sci. Hung. Tom 46, Fasc. 3—4, 1964.

### Список литературы к гл. 3

1. J o n e s R. Les essais Non-Destructifs des Betons. Paris, Ed. Eyrolles, 1967.
2. A v r a m e s c o A. Quelques définitions et notions théoriques (sur la méthode des ondes de surface). Utilisation du Vibreur Goodman-Lab. Cen. Ponts et Chauss. Paris, 1968.
3. B a i n J. Généralités sur le principe et l'utilisation du vibreur léger Goodman-Utilisation du Vibreur Goodman-Lab. Cen. Ponts et Chauss. Paris, 1968.
4. J o n e s R. Court historique de l'auscultation des sols et chaussées par ondes superficielles. Utilisation du Vibreur Goodman-Lab. Cen. Ponts et Chauss. Paris, 1968.
5. B l a i n J. Resultats généraux obtenus à l'aide de la chaîne Goodman au Laboratoire Central durant les années 1965 et 1966. Utilisation du vibreur Goodman-Lab. Cen. Ponts et Chauss. Paris. 1968.
6. T h r o w e r F. N. Etudes théoriques de la dispersion des ondes élastiques dans les chaussées. Utilisation du Vibreur Goodman-Lab. Cen. Ponts et Chauss. Paris, 1968.
7. T h r o w e r E. N. The computation of the dispersion of elastic waves in layered media. In: J. Sond. Vib., vol. 2, nr. 3, 1966. p. 210—226.
8. J o n e s R. Measurement and Interpretation of Surface Vibrations on Soil and Roads. In: Bulletin of the Institute of Physics, August, 1960, p. 197—205.
9. J o n e s R. Following Changes in the Properties of Road Bases by the Surface Wave Propagation Method. In: Civil Engineering, vol. 58, London, May, June, 1964, p. 777—780.
10. J o n e s R., T h r o w e r E. N. and G a t f i e l d E. N. The surface wave method. Session IV of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements Ann Arbor-Michigan 1967.

11. Gouturier J., Siffert M., Tomazini Q., Blain J. et Gramsamer J. C. Directives provisoires concernant les mesures et études au vibreur Goodman. Utilisation du Vibreur Goodman-Lab. Cen. Ponts et Chauss. Paris, 1968.
12. Ducloux A., Poilane J. et Guillemin R. Un an d'utilisation du vibreur Goodman au Laboratoire Regional d'Autun. Utilisation du Vibreur Goodman-Lab. Cen. Ponts et Chauss. Paris. 1968.
13. Gaffield E. N., Page J. La methode d'auscultation par ondes superficielles—Technique experimentales utilisées en Grande Bretagne et applications pratiques. Utilisation du Vibreur Goodman. Paris. 1968.
14. Nijboer L. W., Jones R. Investigation into the dynamic testing of roads. In: Roads and Road Construction, vol. 32, July, 1954, p. 202—209.
15. Jones R. In situ Measurement of the Dynamic Properties of Soil by Vibration Methods. In: Geotechnique. March, 1958.
16. Jones R. și Mayhew H. C. Thickness and Quality of Cemented Surfciugs and Bases—Measuring by a Non-Destructive Surface Wave Method. In: Civ. Eng. and Pub. Works Rev., nr. 60, 1965, p. 523—529.
17. Martincek G. și Pokorný M. Stanovenie pružnych a nepružnych vlastnosti betonu pomocou nedestruktivnych dynamických metod. (Comunicare). CSAV—Bratislava, 1965.
18. Pohl E. Zerstörungsfreie Prüf- und Messmethoden für Beton. Berlin. VEB-Verlag für Bauwesen, 1969.
19. Алексеев А. С. Некоторые обратные проблемы в теории распространения волн. Известия АН СССР, серия геофизическая, II, 1962.
20. Bergström S. G., Linderholm Z. A dynamic method for determining average elastic properties of soil layers. Handlinder 7 Svenska Forskningsinstitut for Cement och Betong. Stockholm, 1946.

#### Список литературы к гл. 4

1. Făcșoaru I. L'experience de l'application des normes roumanies pour la determination de la resistance du béton à l'aide du scleromètre Schmidt. Comunicare INCERC la Sesiunea Grupei RILEM de la Bucuresti, 1964.
2. Kolek J. Analysis of answers to RILEM questionnaire on the Schmidt rebound hammer. In: Matériaux et Constructions vol. 2, no. 10, July — August, 1969.
3. Kolek J. Non-destructive testing of concrete by hardness method. Paper presented at Simposium on Non-destructive testing of concrete and timber. Inst. of Civ. Eng., June 1969.
4. Gæde K., Schmidt E. Rückprallprüfung von Beton mit dichtem Gefüge. In: Deut. Auss. für Stahlbeton, Heft 158. Berlin, 1964.
5. Schmidt E. Versuche mit dem neuen Beton Prüfhammer zur Qualitätsbestimmung des Betons. In: Schweiz. Archl. angew. Wiss. Tech. vol. 17, nr. 5., 1951.
6. UNITEAM. Beton Prüfhammer-Modell L. In: Gebrauchsanweisung. Zürich, März, 1960.
7. UNITEAM. Beton Prüfhammer-Modell M. In: Gebrauchsanweisung. Basel-Zürich, August 1961.
8. UNITEAM. Beton-Prüfhammer-Modell N. In: Gebrauchsanweisung. Basel-Zürich, März 1960.
9. UNITEAM. Baustoff-Prüfhammer-Model P. In: Gebrauchsanweisung. Basel-Zürich, Dezember, 1960.
10. Instrucțiuni tehnice pentru încercarea betonului cu sclerometrul Schmidt. In: Buletin CSCAS, nr. 1/1968.
11. Wesche K. Vergleich von Ergebnissen der Betonschlagprüfung am Bauwerke mit der Norm DIN 4240. Comunicare Inst. für Bauw., Sesiunea Grupei RILEM, de la București, 1964.
12. Făcșoaru I. și Teodoru G. Determinarea rezistenței betonului cu ajutorul sclerometrului Schmidt tip N. In: Buletin INCERC—ISCAS, nr. 3, 1962.
13. Wesche K., Mängel S. Beitrag zur Beurteilung der Festigkeitsverteilung des Betons in Bauwerken. Comunicare Inst. für Bauw. la sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.

14. Făcăoaru I. Chariman's Report. În: Matérieux et Constuctions, vol. 2, nr. 10, July—August 1969, p. 275.
15. Brunarski L. Non-destruktive testing methods. Draft instruction for using sclerometric methods. Comunicare ITB, sesiunea Grupei RILEM de la București, 1964.
16. Ștefanescu - Goangă A. Cercetarea betonului cu sclerometre. București, J. D. T., 1963.
17. \*\*\*. Posuzovani jakosti betonu skušebnim kladvkem se srovnavaci tyčkou. ČSN 732403, din Praha, 1961.
18. Скрамтаев Б. Г. и Лещинский М. Испытание прочности бетона. М., Госстройиздат, 1964.
19. Скрамтаев Б. Г. и Шубенкин П. Ф. Новые методы испытания прочности бетона в сооружениях. Вестник трудов Академии им. Куйбышева № 145, 1959.
20. Gilbert R. Încercarea nedestructivă a betonului cu ciocanul cu pendul. În: Rev. Ind. Constr. și Mat. de Constr., nr. 6/1953.
21. \*\*\* Fchlaghärteprüfer HRS. În: Bedienungsanleitung, Leipzig, VEB, 1960.
22. Iavor T. Zkoušky a měření ve stavebnictvi, Praha, Stat. Naklad. Tech. Lit., 1965.
23. Hönig A. și Zapletal Z. Praha. Nedestruktivni skusebnictvi. Stat. Naklad. Tech. Lit., 1966.
24. Pavlik A. The influences of the structure and of the technology of concrete on the accuracy of the sclerometric tests. Comunicare Civ. Een. Jnst. Praha, 1966.
25. Petrov L. K. On the accuracy of the non-destructive testing of concrete. Comunicare NISI la Sesiunea Comisiei RILEM da la Varna, 1968.
26. Miranda do Camargo M. Schmidt hammer for removal control during Jaguarí pressure tunnel lining construction. Comunicare din Brazilia la sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
27. Pohl E. Zerstörungsfreie Prüf- und Messtechnik für Beton. Berlin, VEB-Verlag für Bauwesen, 1969.
28. Tassios T. P. și Demiris C. A. New non-destructive method for Concrete Strength Determination. Athens, Nat. Techn. Univ., 1968.
29. Jones R. Les Essais Non Destructifs des Betons, Paris, Ed. Fyrolles, 1967.
30. Kolek J. Draft recommendations for the use of hardness methods in the non-destructive testing of concrete. Comunicare la sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
31. Stork J. Microsclerométre pendulaire de torsion. Comunicare CSAV-Bratislava la Sesiana Grupei RILEM de la Aachen, 1966.

#### Список литературы к гл. 5

1. Ciorăscu F. și Oncescu M. Detectarea și măsurarea radiațiilor nucleare. București, Ed. Acad. R. P. R., 1964.
2. Feynman R. P. Fizica Modernă (Trad. din 1, engleză) București Editura, tehnică, 1969.
3. Jones R. Les Essais non-Destructifs des Betons. Paris, Ed. Eyrolles, 1967.
4. Pohl E. Zerstörungsfreie Prüf- und Messmethoden für Beton. Berlin, VEB-Verlag für Bauwesen, 1969.
5. Pohl E. Kerntechnik im Bauwesen. Berlin, VEB-Verlag für Bauwesen, 1964.
6. Pohl E. Determining the effect of changing the geometry of the test arrangement on the measuring results in volume density control of large area concrete building elements by means of gamma radiations. Comunicare Hochs. für Bauw. Leipzig, la Sesiunea Grupei RILEM pentru încercari Nedestructive de la Aachen, 1966.
7. Lachaud R. L'application des radioisotops aux mesures des densité et de teneur en eau sur le terrain. În: Bulletin RILEM, nr. 13, dec. 1961.
8. Bălan St. și alții. Încercarea construcțiilor. București, Editura tehnică 1965.
9. Galambos S., Vajda Z. Verwendung von Radioisotopen im Ungarischen Wiss. Institut. für Hoch- und Tiefbau. În: Wiss. Zeits. Hochs. für Bauw., Leipzig, 1964, Heft 12, p. 199—204.

10. Svejse Centralen. The SVC-Lightweight X-ray Set. Glastrup, 1970.
11. Müller H. Durchleuchtungseinrichtungen. Hamburg, Hanseatische Druckanstalt, 1966.
12. Apostol I. Ciumedean D. și Oncescu M. Die Verwendung von Radionukliden im Strassenbau und Eisenbauwesen der Rumänischen Volksrepublik. In: Wiss. Zeits. Hochs. für Bauw. Leipzig, Heft 12, 1964.
13. Воробьев В. А. Контроль анкерования арматуры в железобетонных конструкциях больших толщин с помощью тормозного излучения бетатрона. «Строительство и архитектура», № 5, 1966.
14. Ananiev L. M. Der Einsatz von Betatronen für die zerstörungsfreie Prüfung von Bauwerken und Baukonstruktionen. Comunicare la Sesiunea Zerstörungsfreie Prüf- und Messtechnik für Beton und Stahlbeton. Hochs. für Bauw., Leipzig, 1969.
15. Gevert. Industrial Radiography. Gevaert Agfa-Mortsel. 1964.
16. Makarov R. A., Basin I. and Seleznev N. Selection of installation and apparatus parameters for radiometric testing of concrete. Comunicare Inst. Fiz. Constr. la Sesiunea Grupei RILEM de la București, 1964.
17. György L. Über Erfahrungen die sich bei Vergleichsmessungen mit Gammastrahlen in den RGW-Ländern ergaben. In: Wiss. Zeits. Hochs. für Bauw. Leipzig, Heft 1/2, 1966.
18. Hö nig A., Zapletal V. Nedestruktivni skušebnictvi. Praha, Statni Naklad. Techn. Lit., 1966.
19. Forrester J. A. Gamma radiography of concrete. Symposium on Non-destructive testing of concrete and timber. London, June, 1969.
20. Făcăoaru I. Non-destructive testing of concrete in Romania. Simp. on Non Destructive Testing of Concrete and Timber. London, June, 1969.
21. Avram C. N., Gobesz F. Beiträge zur Radiographie von Stahlbetonteilen. Comunicare I. P. T. la Sesiunea Zerstörungsfreie Prüf- und Messtechnik für Beton und Stahlbeton. Hochs. für Bauw. Leipzig, 1969.
22. Făcăoaru I. și Bubulac L. Controlul calității stîlpilor de beton armat cu radiații gama fără peliculă fotosensibilă. In: Studii și Cecretari INCERC, nr. 1968.
23. Făcăoaru I., Stepanov C., Pușchilă D. și Stamate Gh. Determinaria armăturilor și defectelor în stîlpi de beton armat prin radiometrie. Referat INCERC, Dec., 1969.
24. Gabesz F. Contribuții la cercetarea elementelor de beton armat de tipul plăcilor prin metode nedestructive atomice. Inst. Politehnic. Timișoara, 1968.
25. Teodorescu D., Pipera G., Stamate Gh. și Făcăoaru I. Resultate comparative in mătirea durabilității mortarelor de ciment supuse agresiunii acide prin folosirea ca adaos a diferitelor tipuri de latex. In: Rev. Materiale plastice, nr. 5, 1969.
26. Lewis W. A. Nuclear Apparatus for Density and Moisture Measurement. Road and Roads Construction, nr. 43, Febr. 1965.
27. Pohl E. Bestimmung der Rohdichte grossflächiger Betonbauteile mit gamma-Strahlen. Jsoptenpraxis. Heft 12, 1966.
28. Brocard J. Application des isotopes radioactifs à la mesure de la densité et de la teneur en eau matériaux et des sols. In: Ann. de l'Institut. Tech. du Bat. et des Trav. Pub., mai 1965.
29. Făcăoaru I. Studiul segregabilității mortarelor de injectare cu isotopul cobalt 60. In: Rev. Constr. și Mat. de Constr. nr. 10/60.
30. Făcăoaru I., Găina N. și Damian F. Controlul calității elementelor de beton precomprimat prin metode radiografice. AII-a Conferință de Betoane. Mamaia, oct., 1969.
31. Făcăoaru I. și Teodoru G. Comportarea betoanelor speciale sub acțiunea factorilor din exploatare. Referat INCERC, Nov. 1969.
32. Hö nig A. Alectric exposure meter for gamma-ray radiography. Comunicare VUT-65-D, 2, Brno, 1965.
33. Hö nig A. și Zapletal V. Ultrasonic and radiometric measurement of homogeneity and density of concrete în biological shield of nuclear reactor. Comunicare VUT-65-D-3. Brno, 1965.

34. Harland D. G. Measuring the density of thin asphalt or concrete layers with a gamma-ray back scatter apparatus. Nuclear Engin. and Design, nr. 3, 1966, p. 467—475.
35. Heet J. Determination de la teneur en eau des sols en place par la méthode neutronique. În: Buletin RILEM, nr. 15, Juin, 1962.
36. De Boever J. și De Boodt M. The application of cadmium and cast nylon in the measurement of soil moisture with a neutron moisture meter. Gand. Fac. voor Landbouwwetenschappen, 1965.
37. Apostol I. Bestimmung der Feuchtigkeit von Naturgestein Beton und Betonfahrbahnen mit radiometrischen Methoden. Wiss. Zeits. Hochs. für Bauw. Leipzig, Heft 1/2, 1966.
38. Cermak H. Automatische Wasserdosierung in VEB Betonwerk, Cossebaude. Wiss. Zeits. Hochs. für Bauw. Leipzig, Heft 1/2 1966.
39. Cermak N. Neutronensondengesteuerte dichtenabhängige Schaumdosierung bei der Herstellung von LZ Schaumbeton. Symp. Zerstörungsfreie Prüf- und Messtechnik für Beton und Stahlbeton. Hochs. für Bauw. Leipzig, 1969.
40. Ciurmedea D. și Crisan R. Verwendung radioactiver Präparate auf den Baustellen der Rumänischen Socialistischen Republik. Wiss. Zeits. Hochs. für Bauw., Leipzig, Heft 1/2, 1966.

#### Список литературы к гл. 6

1. Saxton I. A. Electrical Properties of Water. Wireless Engineer, 1949, p. 288—292.
2. Применение достижений современной физики в строительстве. По материалам все-союзного совещания. Под ред. Н. В. Морозова. М., Стройиздат, 1967.
3. Watson A. Measurement and control of moisture content by microwave absorption. In: BRS—Current Papers, Series 3, 1963.
4. Wiener U. Măsurări electrice industriale. — Măsurarea mărimilor magnetice. Bucuresti, Editura tehnica, 1969.
5. Paquet J. Etude dielectrique des matériaux humides. În: Onde Electrique, Ed. Chiron, Paris, nr. 450, Sept. 1964.
6. Watson A. The Non-destructive Measurement of Water Content by the Microwave Absorption Method. În: CIB—Bulletin, nr. 3, 1960, p. 15—16.
7. Taylor H. B. Microwave Moisture Measurement. În: AEI-Engineering, vol. 3, Jan/Febr., 1965.
8. Von Hippel A. Dielectric constants for water at 3 Gc/S and 106 Gc/S. Dielectric Materials and Applications, p. 33. Chapman and Hall Ltd. Londra, 1954.
9. C. E. B. T. P. Application du rayonnement électromagnétique á l'étude de l'eau dans les matériaux. Paris. 1965.
10. Watson A. Measurement of moist content in some structures and materials by microwave absor În: BRS—Current papers, Series 63, 1965.
11. Wiebenga J. Measurement of the moisture content of concrete by means of microwave (2430 Mc/S) absorption. Comunicare TNO Sesiunea Grupei RILEM de la Aachen, 1966.
12. Milla A. Electronica. București: Editura tehnică, 1967.
13. PROCEQ. Pachometer Teba—Type E4, Zürich Operating Instructions, 1966.
14. Reiding F. I. A portable reinforcement covermeter. Comunicare TNO la Sesiunea Grupei RILEM, de la Aachen, 1966.
15. Brunarski L., Karminski A. Die Verwendung verschiedener magnetischer Geräte für die Prüfung der Bewehrung im Stahlbeton. Leipzig, Wiss. Zeits. Hochschule für Bauwesen, 1968.
16. Johansson A., Warris B. Avvikelsev i armerings—stängernas läge. În: Halmstads Jörnerks Tekniska Meddelanden nr. 20/1967.
17. Johansson A., Warris B. Deviations in the location of reinforcement (Proceedings Nr 40). Stockholm, Swedisch Gem. and Concr. Res. Inst. 1969.
18. Pohl E. Zerstörungsfreie Prüf- und Messmethoden für Beton. Berlin. VEB-Verlag für Bauwesen, 1969.
19. UNITEAM. Pachometer Teba—type N 6. Zürich Gebrauchsanweisung. März, 1961.

20. Halstead P. E. The Covermeter apparatus for measuring the depth of reinforcement below the surface of hardened concrete. În: Cem and Concr. Ass. TRA nr. 197/1955.
21. Yalıtıkaya E., Sentürk S. Estimation of cement of finished concrete depending on determination of total hydrogen amount as water using fast neutron scattering. Bulletin RILEM, nr. 15, 1962.

### Список литературы к гл. 7

1. Skramtaev B. G. și Lescinski M. Ju. Complex methods of non-destructive tests of concrete in constructions and structural works. Bulletin RILEM nr. 30/1966, March, p. 99—105.
2. Wesche K. Die Prüfung der Betonfestigkeit im Bauwerk. În: Betonsteinzeitung, Heft 6, 1967.
3. Făcăoaru I. Non-destructive testing of concrete in Romania. Conference on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber-Institution of Civil Engineering. London, May, 1969.
4. \*\*\* Instrucțiuni tehnice privind utilizarea metodelor nedestructive combinate la măsurarea rezistenței la compresiune a betoanelor. Buletinul construcțiilor nr. 5, 1971.
5. Făcăoaru I., Dumitrescu I., Constantinescu I. Concrete strength determination by non-destructive combined methods. Comunicare INCERC la Sesiunea Comisiei RILEM de la Aachen, 1966.
6. Făcăoaru I., Dumitrescu I., Stamate Gh. New development and experience in applying combined non-destructive methods for testing concrete Comunicare INCERC la Sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
7. Făcăoaru I., Stamate Gh. și Pușchilă D. Utilizarea metodelor nedestructive combinate la măsurarea rezistenței betonului la compresiune. Referat INCERC, sept. 1969.
8. Ștefănescu —Goangă A. Sur l'emploi des methods d'essai non-destructives roumaines au controle de la qualité du beton. Comunicare rust 5 Brasov la sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
9. Făcăoaru I. Kombinierte Zerstörungsfreie Prüfmethode für Beton in Rumänien. Comunicare la Sesiunea Hochschule für Bauwesen. Leipzig, April, 1969.
10. Făcăoaru I., Popescu P., Stamate Gh. and Tannenbaum M. Quality control of concrete in prestressed elements by non-destructive testing methods. Paper presented at the RILEM-NDT Commission meeting in Slough (6.8), 1970.
11. Slachta E. Ghodnoteni dynamickich sonických metod pro zkouseni vozovkoveho betonu. Comunicare. Vyzkumny Ustav Dobravni. Praha, 1958.
12. Brunarski L. Gleichzeitige Anwendung verschiedener zerstörungsfreie Prüfmethode zur Gutekontrolle des Betons. În: Wiss. Zeit. Hochschule für Bauwesen, Leipzig, Heft 12, 1962.
13. Wiebenga J. A comparison between various combined non-destructive testing methods, to derive the compressive strength of concrete. Comunicare TNO la Sesiunea Comisiei RILEM de la Varna, 1968.
14. Jones R. RILEM Working Group on the Non-Destructive Testing of Concrete. Chairman's Report of the meeting in Bucarest 1964, Bulletin RILEM nr. 24, Juni, 1965.
15. Galan A. Prüfung elastischer und nichtelastischer Eigenschaften von Beton mit Hilfe von Ultraschall-impulsen. În: Wiss. Zeit. Nachsch. für Bauw. Leipzig, Heft 1/2, 1966.
16. Kochis B. Ultrasonic Testing of Concrete. Comunicare la sesiunea Comisiei RILEM de la Aachen, 1966.
17. Уржумцев Ю. С. Исследование бетона по трем ультразвуковым характеристикам. Автореферат диссертации. Рига, 1960.
18. Martinek G. Nedestructivne dynamike metody skusania stavebnych materialov. Comunicare S. A. V., 1962.



19. P o k a r n y M. An universal apparatus for mesuring the resonance frequencies, the demping constant and phase velocity of stress waves propagation. Comunicare CSAV. Bratislava, 1966.
20. B r u n a r s k i L., B a s i n J. s i M a k a r o v R. Okreslanie jakosti betonu w konstrukcjach przy zastosowaniu kompleksowej metody ultra dzwiekowo radiologicznej. In: Przegląd Budowlany, nr. 8, 1960.

#### Дополнительная литература к гл. 7 на русском языке

1. Б р у н а р с к и Л., М а к а р о в Р. А. Исследование корреляционных связей, полученных при использовании комплексных методов определения прочности бетона. — В сб.: Применение достижений современной физики в строительстве. Под ред. Н. В. Морозова. М., Стройиздат, 1967.
2. Г л у х о в с к о й К. А., Х л у т к о в Д. П., К р ы л о в Н. А., С у д а к о в В. В. Неразрушающие (радиотехнические) методы испытания строительных материалов и изделий. — В сб.: Экспериментальные исследования инженерных сооружений. М., «Наука», 1973.
3. Д з е н и с В. В., С е р г е е в О. Е. Использование продольных и поперечных ультразвуковых колебаний для контроля механических свойств бетона. «Бетон и железобетон», 1969, № 7.
4. Д у р а с о в А. С., К р ы л о в Н. А. Физические методы контроля качества бетона. Л.—М., Госстройиздат, 1959, стр. 84—85.
5. К о в а л е в В. В., У л и т и н О. А., М и л о в В. А., Т а р б а е в В. В. Некоторые вопросы контроля качества железобетонных изделий и конструкций неразрушающими методами. — В сб.: Экспериментальные исследования инженерных сооружений. М., «Наука», 1973.
6. М и л о в В. А., К о м а р о в с к и й А. А. Комплексный упруго-пластический неразрушающий метод контроля прочности бетона. «Строительные материалы и конструкции», 1972, № 3 (на укр. яз.)
7. Н о г и н С. И. и Ш л я к ц у М. И., П е л ь м е н е в А. И., В о л ь ф И. В. и Л и х а ч е в В. Д. — В сб.: Методы неразрушающего контроля качества железобетонных конструкций. Киев, «Будівельник», 1972.
8. О в ч а р В. П. Исследование неразрушающих методов контроля прочности бетона армоцементных конструкций. Автореферат канд. диссерт., Киев, 1971.
9. У ж п о л я в и ч ю с Б. Б. Теоретические предпосылки неразрушающих методов определения прочности пористых твердых тел. — В сб.: Экспериментальное исследование инженерных сооружений (Материалы ко 2-му симпозиуму). Издание ЦБТИ Госстроя ЛитССР, Вильнюс, 1969.
10. У ж п о л я в и ч ю с Б. Б. Исследования по косвенному определению прочности бетона в железобетонных конструкциях. Автореферат канд. диссерт., Вильнюс, 1968.
11. У р ж у м ц е в Ю. С. Исследование прочности бетона по скорости распространения ультразвука, коэффициенту затухания и коэффициенту релеевского рассеяния. — В сб.: Ультразвук в строительной технике. Под ред. Ю. А. Нилендера. М., Госстройиздат, 1962, стр. 57—68.

# О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие редактора перевода . . . . .	3
Введение . . . . .	5
<b>1. Резонансный метод</b>	<b>7</b>
1.1. Принцип резонансного метода . . . . .	7
1.2. Резонансный метод с использованием продольных колебаний . . . . .	9
1.3. Резонансный метод с использованием изгибных колебаний . . . . .	12
1.4. Резонансный метод крутильных колебаний . . . . .	15
1.5. Измерения затухания колебаний . . . . .	17
1.6. Аппаратура для проведения испытаний резонансным методом . . . . .	20
1.7. Применение резонансного метода . . . . .	25
1.7.1. Исследование процессов твердения бетона . . . . .	25
1.7.2. Исследование влияния влажности на твердение бетона . . . . .	27
1.7.3. Определение динамического модуля упругости и его связь со статическим модулем упругости . . . . .	29
1.7.4. Определение динамического коэффициента Пуассона и его связь со статическим коэффициентом Пуассона . . . . .	35
1.7.5. Испытание бетона на морозостойкость . . . . .	38
1.7.6. Испытание бетона на воздействие агрессивных сред . . . . .	40
1.7.7. Исследование свойств бетона по затуханию колебаний . . . . .	41
1.7.8. Определение механической прочности бетона . . . . .	43
1.7.9. Исследование работы бетона на знакопеременные нагрузки . . . . .	45
1.7.10. Контроль качества забивных свай . . . . .	46
1.7.11. Испытание балок из предварительно-напряженного железобетона изгибными колебаниями . . . . .	48
1.7.12. Определение толщины бетонной плиты . . . . .	49
1.7.13. Продольный резонанс образца в форме куба . . . . .	50
<b>2. Ультразвуковой импульсный метод</b>	<b>51</b>
2.1. Общие данные . . . . .	51
2.2. Принцип метода . . . . .	52
2.2.1. Распространение ультразвукового импульса в бетоне . . . . .	52
2.2.2. Процесс генерации импульса . . . . .	53
2.2.3. Влияние неоднородности, вязкоупругости, анизотропии бетона и геометрической формы образцов на распространение импульса . . . . .	54

2.3. Аппаратура, применяемая в ультразвуковом импульсном методе . . . . .	56
2.3.1. Прибор для испытания методом удара с двумя приемниками . . . . .	56
2.3.2. Прибор для ударного метода с одним приемником . . . . .	57
2.3.3. Ультразвуковой импульсный прибор . . . . .	58
2.4. Техника измерений . . . . .	60
2.4.1. Методика размещения преобразователей . . . . .	60
2.4.2. Выбор преобразователей . . . . .	60
2.4.3. Выбор мест испытания . . . . .	61
2.4.4. Подготовка места испытания. Контактная среда . . . . .	63
2.4.5. Техника работы с приборами . . . . .	64
2.5. Результаты применения ультразвукового импульсного метода . . . . .	68
2.5.1. Влияние частоты сигнала и размеров образца на скорость распростра- нения импульса . . . . .	69
2.5.2. Влияние влажности и температуры на скорость распространения ультразвука в бетоне . . . . .	72
2.5.3. Влияние арматуры на скорость распространения ультразвука в бетоне	74
2.5.4. Ультразвуковой контроль твердения бетона на цементе и других вяжущих . . . . .	78
2.5.5. Определение динамических упругих постоянных бетона . . . . .	82
2.5.6. Дефектоскопия бетона с помощью ультразвукового импульсного метода . . . . .	86
2.5.7. Определение толщины разрушенного слоя многослойной конструкции	90
2.5.8. Поведение бетона и раствора при агрессивном воздействии . . . . .	93
2.5.9. Изменение структуры бетона в процессе нагружения . . . . .	96
2.5.10. Связь между скоростью ультразвука и прочностью бетона при сжатии	100
2.5.11. Связь между скоростью распространения и прочностью бетона на растяжение при изгибе. . . . .	124
2.5.12. Связь между затуханием и прочностью при сжатии . . . . .	128
2.5.13. Контроль качества забивных свай . . . . .	131
2.5.14. Определение однородности качества бетона . . . . .	133
2.5.15. Контроль качества бетона в сборных элементах . . . . .	137
2.5.16. Контроль качества бетона на строительстве . . . . .	139
<b>3. Метод поверхностной волны . . . . .</b>	<b>144</b>
3.1. Принцип метода . . . . .	144
3.2. Испытательная аппаратура . . . . .	150
3.3. Техника измерений . . . . .	153
3.4. Применение метода поверхностной волны . . . . .	157
3.4.1. Определение упругих свойств материала . . . . .	157
3.4.2. Контроль качества бетона в сооружении. . . . .	158
3.4.3. Определение прочности бетона методом поверхностной волны . . . . .	158
3.4.4. Изменение структуры бетона во времени . . . . .	161

3.4.5. Изменение качества бетона на протяженных участках . . . . .	162
3.4.6. Определение толщины плиты . . . . .	163
<b>4. Механические методы определения поверхностной твердости бетона . . . . .</b>	<b>166</b>
4.1. Методы измерения твердости бетона, основанные на отскоке . . . . .	168
4.1.1. Принцип метода . . . . .	168
4.1.2. Применяемая аппаратура . . . . .	168
4.1.3. Испытания . . . . .	171
4.1.4. Определение прочности бетона при сжатии . . . . .	172
4.1.5. Контроль однородности качества бетона . . . . .	183
4.2. Методы, основанные на отпечатке . . . . .	185
4.2.1. Принцип метода . . . . .	185
4.2.2. Применяемая аппаратура . . . . .	189
4.2.3. Подготовка и проведение испытания . . . . .	191
4.2.4. Определение прочности бетона . . . . .	192
4.3. Методы выдергивания и забивки стержней . . . . .	195
4.3.1. Метод забивки стержня . . . . .	195
4.3.2. Метод выдергивания стержня . . . . .	196
<b>5. Радиационные методы . . . . .</b>	<b>200</b>
5.1. Введение . . . . .	200
5.2. Методы проникающей радиации . . . . .	200
5.2.1. Принципы метода проникающей радиации . . . . .	200
5.2.2. Аппаратура для создания и детектирования проникающей радиации	208
5.2.3. Применение метода проникающей радиации . . . . .	214
5.3. Нейтронный метод . . . . .	231
5.3.1. Принцип метода . . . . .	231
5.3.2. Испытательная аппаратура . . . . .	234
5.3.3. Применение нейтронного метода . . . . .	236
<b>6. Электромагнитные методы . . . . .</b>	<b>239</b>
6.1. Метод поглощения электромагнитных волн. . . . .	239
6.1.1. Принцип метода . . . . .	239
6.1.2. Аппаратура для исследований . . . . .	243
6.1.3. Техника измерений . . . . .	244
6.1.4. Применение метода поглощения электромагнитных волн . . . . .	245
6.2. Метод электромагнитной индукции . . . . .	248
6.2.1. Принцип электромагнитного метода . . . . .	248
6.2.2. Аппаратура для испытания и ее применение . . . . .	249
6.2.3. Применение метода электромагнитной индукции . . . . .	251

<b>7. Комбинированные методы</b> . . . . .	254
7.1. Введение . . . . .	254
7.2. Комбинированный метод наложения . . . . .	255
7.3. Комбинированный метод: скорость распространения ультразвука — показатель отскока . . . . .	258
7.4. Комбинированный метод: скорость распространения ультразвука — поверхностная твердость . . . . .	272
7.5. Комбинированный метод: скорость распространения — затухание ультразвука . . . . .	274
7.5.1. Комбинированный метод: скорость распространения — затухание переднего фронта волны . . . . .	274
7.5.2. Комбинированный метод: скорость распространения — коэффициент затухания ультразвука . . . . .	275
7.6. Комбинированный метод: скорость распространения ультразвука — поглощение гамма-излучения . . . . .	276
7.6.1. Комбинированный аналитический метод: скорость распространения ультразвука — коэффициент ослабления гамма-излучения . . . . .	277
7.7. Сложный комбинированный метод . . . . .	277
Список литературы . . . . .	279

*Р. Джонс, И. Фэксвоару*

**Неразрушающие методы испытаний бетонов**  
(перевод с румынского)

Редактор издательства Н. М. Николаева  
Внешнее оформление художника К. Д. Юрченко  
Технические редакторы Н. Г. Бочкова, Т. В. Кузнецова  
Корректоры В. И. Галюзова, В. С. Якунина

---

Сдано в набор 11. X. 1973 г. Подписано к печати 23.IV. 1974 г.  
Формат 70×90<sup>1/16</sup> д. л. Бумага типографская № 1.  
21,645 усл. печ. л. (уч.-изд. 22,1 л.)  
Изд. № AVI-3951 Зак. № 553 Цена 1 р. 31 к.

---

*Стройиздат*

*103777, Москва, Кузнецкий мост, д. 9*

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
Москва, И-41, Б. Переяславская ул., дом. № 46

Таблица соотношений между некоторыми единицами физических величин, подлежащих изъятию, и единицами СИ

Наименование величины	Единица				Соотношение единиц					
	подлежащая изъятию		СИ							
	наименование	обозначение	наименование	обозначение						
Сила, нагрузка, вес	килограмм-сила тонна-сила грамм-сила	кгс тс гс	} ньютон	Н	1 кгс $\approx$ 9,8 Н $\approx$ 10 Н 1 тс $\approx$ 9,8 · 10 <sup>3</sup> Н $\approx$ 10 кН 1 гс $\approx$ 9,8 · 10 <sup>-3</sup> Н $\approx$ 10 мН					
						Линейная нагрузка	кгс/м	} ньютон на метр	Н/м	1 кгс/м $\approx$ 10 Н/м
Давление	килограмм-сила на квадратный сантиметр миллиметр водяного столба миллиметр ртутного столба	кгс/см <sup>2</sup> мм вод. ст. кгс/мм <sup>2</sup>	} паскаль	Па	1 кгс/см <sup>2</sup> $\approx$ 9,8 · 10 <sup>4</sup> Па $\approx$ 10 <sup>5</sup> Па $\approx$ 0,1 МПа 1 мм вод. ст. $\approx$ 9,8 Па $\approx$ 10 Па 1 мм рт. ст. $\approx$ 133,3 Па					

Наименование величины	Единица				Соотношение единиц
	подлежащая изъятию		СИ		
	наименование	обозначение	наименование	обозначение	
Механическое напряжение Модуль продольной упругости, модуль сдвига, модуль объемного сжатия	килограмм-сила на квадратный миллиметр килограмм-сила на квадратный сантиметр	кгс/см <sup>2</sup>	паскаль	Па	$1 \text{ кгс/мм}^2 \approx 9,8 \cdot 10^6 \text{ Па} \approx 10^7 \text{ Па}$ $1 \text{ кгс/см}^2 \approx 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па} \approx 0,1 \text{ МПа}$
Момент силы, момент пары сил	килограмм-сила-метр	кгс·м	ньютон-метр	Н·м	$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} \approx 9,8 \text{ Н} \cdot \text{м} \approx 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$
Работа (энергия)	килограмм-сила-метр	кгс·м	джоуль	Дж	$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} \approx 9,8 \text{ Дж} \approx 10 \text{ Дж}$



**Перечень литературы  
по применению единиц физических величин**

1. Проект стандарта «Единицы физических величин», 1970 г.
2. ГОСТ 16263—70. Государственная система обеспечения единства. Метрология. Термины и определения.
3. Методические указания по практическому применению государственного стандарта «Единицы физических величин» (готовятся к печати).
4. «Измерительная техника». Раздел «Консультации», 1971, № 12; 1972, № 1—5 и 7.
5. «Промышленное строительство». Раздел «Консультации», 1973, № 1, 3, 8.
6. Аристов Е. М. Единицы физических величин. Л., «Судостроение», 1972.
7. Бурдун Г. Д. Справочник по Международной системе единиц. М., Изд-во стандартов, 1971.
8. Бурдун Г. Д. и Марков Б. Н. Основы метрологии. М., Изд-во стандартов, 1972.
9. ВИНТИ. Пособие для референтов, редакторов и корректоров. М., 1971.
10. Госстрой СССР. ЦНИИОМТП. Практическое пособие по метрологическому обеспечению строительного производства. М., Стройиздат, 1973.
11. Справочная книга корректора и редактора. М., «Книга» (готовится к печати).
12. Стоцкий Л. Р. Справочник по единицам физических величин. М., «Недра» (готовится к печати).
13. Стоцкий Л. Р. «Единицы физических величин — паскаль, сименс и моль» — «Физика в школе», 1973, № 2.
14. Тюрин Н. И. Введение в метрологию. М., Изд-во стандартов, 1973.