

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ.....	1
1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТА СТРОИТЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ .....	1
1.2. ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	16
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ И КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	29
2.1. ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	29
2.2. ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	38
2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ СТРОИТЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ .....	46
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	52
3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ ПОПРАВКИ И ПРОГИБА БАЛКИ ПРИ ПРИЕМО- СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ .....	52
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ .....	59
4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ..... <b>Ошибка! Залкадка не определена.</b>	
4.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ .....	63

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

### 1.1. Определение физико-механических характеристик элемента строительной конструкции

*Теоретические сведения.*

#### **Определение модуля упругости бетона.**

**Модуль упругости бетона** — это коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и соответствующей ему относительной продольной упругомгновенной деформацией при  $\sigma_l = 0,3 \cdot R_{np}$  при осевом сжатии образцов. Значение начального модуля упругости тяжелого бетона при сжатии и растяжении приведено в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная

редакция СНиП 52-01-2003». Данный СП действующий и обязательных к применению.

Упругие свойства бетона зависят от факторов:

- качества и объемного содержания заполнителей;
- класса материала;
- температуры воздуха и интенсивности радиоактивного излучения;
- влажности среды;
- времени воздействия нагрузки;
- условий твердения смеси; возраста бетона;
- армирования.

Определить модуль упругости можно двумя способами:

- механическим, при котором используются специальные образцы, которые разрушаются в процессе исследования;
- ультразвуковым, при котором не происходит разрушение образцов.

Механическим способом модуль упругости бетона можно определить с помощью тензометров или других приборов, обеспечивающих измерение относительных деформаций с точностью не ниже  $1 \cdot 10^{-5}$ . Допускается использовать проводниковые тензорезисторы, наклеиваемые на поверхность бетона. Интервал рабочих температур помещения, где проводятся испытания от 10 °С до 30 °С.

#### **Методика определение модуля упругости бетона механическими методами.**

Эксперимент производится на образцах стандартной формы и размеров: 150×150×600 мм или 100×100×400 мм. Перед испытанием проводится визуальный осмотр, устанавливается правильность геометрической формы, состояние поверхности границ призмы.

До испытания образцы взвешиваются и обмеряются для последующего определения их объемной массы, данные фиксируются. Для измерения продольных деформаций бетона и центрирования образцов, на боковых гранях

образца крепят индикаторы в количестве четырех – по одному на каждой грани. Индикаторы – устанавливают при помощи съемных металлических рамок. Из-за стесненных условий деформирования вблизи приопорных участков образца, где приложена нагрузка, максимальная база измерения деформаций в направлении действия осевой нагрузки не должна превышать 2/3 высоты образца. Измерение поперечных деформаций можно проводить с помощью тензорезисторов на базе не менее 50 мм.

Центрирование проводится путем пробных нагрузок добиваясь при этом того, чтобы деформации крайних волокон по четырем граням образца не отклонялись от среднего значения более, чем на  $\pm 10\%$ . Если к моменту разрушения отклонения превысят  $\pm 20\%$ , результаты испытания бракуются. При этом смещение геометрической оси образца относительно геометрической оси прессы не должно превышать для призм: 150x150x600 – 7,5 мм, 100x100x400 – 5 мм. Нагрузка на образец должна возрастать ступенями до конца разрушения. Величина первых двух ступеней составляет приблизительно 0,05 от ожидаемой разрушающей нагрузки  $P_p$ , затем величина ступени увеличивается вдвое. Начиная с нагрузки  $0,8 \cdot P_p$ , все последующие ступени целесообразно уменьшить до  $0,05 \cdot P_p$ . На каждой ступени производится выдержка нагрузки, которая сохраняется постоянной в продолжении всего испытания. Выдержка на каждой ступени не должна превышать 5 мин, а общая продолжительность испытания не менее 20 мин. Нагрузки и время выдержки на каждой ступени фиксируются. Во время выдержки производится осмотр призмы с целью обнаружения возникших трещин, и снимаются показания с приборов. Следует фиксировать деформации образцов, возникающие в конце приложения ступени нагрузки и в конце ее выдержки. По максимальной нагрузке, вызвавшей разрушение образца, определяют прочность, а начальный модуль упругости бетона при сжатии определяют на основе измеренных деформаций по формуле:

$$E_b = \frac{\sum \Delta \sigma}{\sum \Delta \varepsilon_t}$$

где  $\sum \Delta \sigma$  – сумма приращений напряжений на каждой ступени от 0,05 до 0,03· $P_p$ ;  $\sum \Delta \varepsilon_t$  - сумма приращений относительно упруго–мгновенной деформации на каждой ступени в тех же пределах.

Коэффициент поперечных упруго–мгновенных деформаций определяют по формуле:

$$V = \frac{\varepsilon_{2b}}{\varepsilon_{1b}}$$

где  $\varepsilon_{2b}$ ,  $\varepsilon_{1b}$  - относительные упруго–мгновенные поперечные и продольные деформации бетона соответственно для данного этапа нагружения.

Определение модуля упругости бетона ультразвуковым методом в лабораторных условиях и на объекте обследования будет рассмотрено дальше.

### **Построение градуировочной зависимости определения прочности бетона. Установление градуировочной зависимости «косвенная характеристика–прочность»**

Применение механических неразрушающих методов контроля прочности бетона всегда сопровождается построением экспериментально установленной градуировочной зависимости (кроме прямых неразрушающих методов). Также допускается проводить экспертную оценку прочности бетона при применении ультразвука с использованием универсальной градуировочной зависимости по ГОСТ 17624-2012.

Для построения градуировочной зависимости или привязки универсальной градуировочной зависимости используют результаты прямых испытаний на сжатие образцов, изготовленных из кернов, отобранных из конструкций, и результаты измерения косвенной характеристики неразрушающего метода, полученные на участках отбора кернов. Допускается замена образцов кернов на прямые неразрушающие методы определения прочности по ГОСТ 22690-2015. Для построения градуировочной зависимости

следует иметь не менее 12 параллельных измерений прочности бетона по образцам из кернов и косвенной характеристики, определяемой прибором неразрушающего контроля.

Как правило, для аппроксимации результатов измерения для метода упругого отскока используется линейная зависимость ( $R = a + bX$ ), а для ультразвукового метода, в зависимости от диапазона варьирования прочности, — линейная или экспоненциальная ( $R = a \cdot e^{bx}$ ).

Построенная градуировочная зависимость должна быть проверена согласно указаниям, в соответствии с документами по стандартизации.

### **Определение усилия натяжения в арматуре.**

Измерения силы натяжения арматуры по показаниям динамометра.

Метод измерения силы натяжения арматуры по показаниям динамометра основан на связи между силой натяжения и деформациями динамометра. Динамометр включают в силовую цепь арматуры между концевыми упорами или за их пределами таким образом, чтобы сила натяжения арматуры воспринималась динамометром. Силы натяжения арматуры определяют по градуировочной характеристике динамометра. При включении динамометра в цепь из нескольких параллельно расположенных арматурных элементов измеряют суммарную силу натяжения. Для измерения силы натяжения арматуры применяют образцовые динамометры. Допускается применение других динамометров с классом точности не ниже 2,5. Величины получаемых показаний должны находиться в пределах 30-100% шкалы динамометра.

Измерения силы натяжения арматуры по показаниям манометра.

Метод измерения силы натяжения по показаниям манометра основан на зависимости между давлением в цилиндре домкрата, измеряемом манометром, и силой натяжения арматуры. Измерение силы натяжения арматуры по показаниям манометра применяют при натяжении ее гидравлическими домкратами. Определение силы натяжения арматуры по

показаниям манометра осуществляют непосредственно в процессе натяжения и завершают при передаче усилия с домкрата на упоры формы или стенда. При групповом натяжении арматуры определяют общую силу. Для измерения силы натяжения арматуры применяют образцовые манометры с гидродомкратами. Класс точности манометров должен быть не ниже 1,5. При измерении силы натяжения по показаниям манометра величины получаемых значений должны находиться в пределах 30-90% шкалы манометра. При натяжении арматуры гидравлическими домкратами в гидросистеме устанавливают те же манометры, с которыми проводилась градуировка.

Измерение силы натяжения арматуры по величине ее удлинения.

Метод измерения силы натяжения по величине удлинения напрягаемой арматуры основан на зависимости удлинения арматуры от величины напряжений, которая с учетом площади поперечного сечения арматуры определяет силу натяжения. Относительно невысокая точность этого метода обуславливается изменчивостью упругопластических свойств арматурной стали, а также деформативностью форм и упоров. Для измерения натяжения по величине удлинения необходимо определить величину истинного удлинения арматурного элемента при его натяжении и иметь диаграмму "напряжение - удлинение" арматуры. При электротермическом способе натяжения с нагревом вне формы длина арматурного элемента назначается заранее с учетом упругопластических свойств стали, длины формы, потерь напряжений вследствие деформации форм, смещения и смятия упоров арматуры и систематически контролируется. Эти потери устанавливаются в начале производства и проверяются периодически. Метод измерения силы натяжения по удлинению арматуры применяют в сочетании с методами измерения силы натяжения по показаниям манометра или динамометра. При этом фиксируется момент начала смещения стрелки манометра или динамометра и после этого измеряется удлинение арматуры. Силу натяжения

арматуры по ее удлинению определяют как произведение площади ее поперечного сечения на величину напряжения.

**Задача 1.1.1.** Определение модуля упругости бетона в лабораторных условиях.

В результате обследования железобетонных конструкций одного из объектов выполнили отбор кернов, диаметром 55 мм, для проведения испытаний. С использованием ультразвукового прибора «Бетон-32» определили время прохождения сигнала через образец. Результаты измерений приведены в Таблица 1-1

Таблица 1-1.

**Результаты поверхностного прозвучивания.**

Образец	Длина образца (база прозвучивания) $L$ , мм	Время прохождения УЗИ $t$ , мкс
1	300	71,2
2	290	70,4
3	295	70,5
4	278	71,5
5	315	69,8
6	304	73,2

Требуется определить статический модуль упругости, если плотность бетона  $230 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ .

**Решение.** Скорость прохождения ультразвукового сигнала в материале зависит от его упругих характеристик — плотности  $\rho$  и динамического модуля упругости  $E_{\text{din}}$ . Динамический модуль упругости определяют при деформациях, близких к нулю. Для перехода к расчетному значению статического модуля упругости  $E_{\text{st}}$  используют формулу:

$$E_{\text{st}} = E_{\text{din}} \sqrt{\left(1 - \frac{\sigma}{R_n}\right)} \quad (1-1)$$

где  $\sigma$  — проектный уровень напряжения, МПа;  $R_n$  — нормативное значение прочности бетона, МПа.

Динамический модуль упругости определяют по формуле:

$$E_{\text{din}} = \frac{v^2 \rho}{k} \quad (1-2)$$

где  $k$  — коэффициент формы образца, учитывающий различия в условиях распространения волн при различной геометрии исследуемого объекта.

Для стержневого элемента, где длина волны ультразвука более чем в 2 раза меньше длины образца ( $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{4000}{60000} = 6,7 \text{ см} < 2 \cdot L = 60 \text{ см}$ ), поэтому  $k=1$ . Определим среднюю скорость распространения ультразвукового импульса:

$$v = \frac{\frac{L_1}{t_1} + \frac{L_2}{t_2} + \frac{L_3}{t_3} + \frac{L_4}{t_4} + \frac{L_5}{t_5} + \frac{L_6}{t_6}}{6} = 4179 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Определим динамический модуль упругости:

$$E_{\text{din}} = 4179^2 \cdot 230 = 40160 \text{ МПа.}$$

Статический модуль упругости определим для интенсивности напряжения  $\sigma = 0,3R$ , в соответствии с п. 5.2 ГОСТ 24452–80:

$$E_{\text{st}} = 40160 \sqrt{(1 - 0,3)} = 3360 \text{ МПа.}$$

**Задача 1.1.2.** Определение модуля упругости бетона в условиях объекта обследования.

По результатам ультразвуковых испытаний бетона сжатой зоны железобетонной балки получено время прохождения ультразвукового сигнала (Рисунок 1.1)  $t = 65,8 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ . Вес балки  $P = 580 \text{ кгс}$ . Требуется определить динамический модуль упругости  $E_{\text{din}}$  бетона балки, если коэффициент поперечной деформации бетона  $\mu = 0,2$ .

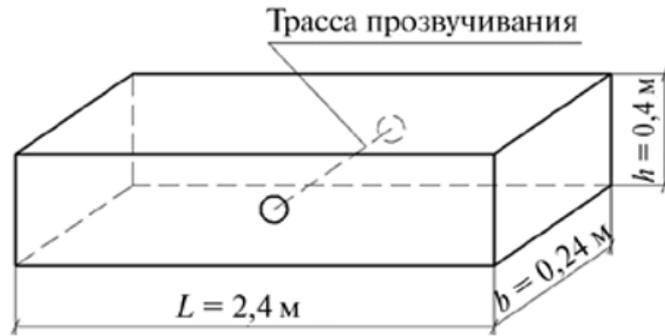


Рисунок 1.1 Исследуемая балка

**Решение.** Динамический модуль упругости бетона определяют по формуле (3.2), но при трехмерной конструкции коэффициент формы образца определяют по формуле:

$$k = \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-\mu)} = 0,83.$$

Скорость ультразвукового импульса:

$$v = \frac{b}{t} = \frac{0,24}{65,8 \cdot 10^{-6}} = 3647.$$

Плотность бетона балки необходимо представить в виде объемного веса:

$$\rho = \frac{P}{L \cdot b \cdot h \cdot g} = \frac{580}{2,4 \cdot 0,24 \cdot 0,4 \cdot 9,8} = 259,6 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}.$$

Определим динамический модуль упругости:

$$E_{\text{din}} = \frac{3647^2}{0,83} = 41170 \text{ МПа}.$$

**Задача 1.1.3.** Построение градуировочной зависимости определения прочности бетона.

При проведении обследования фундаментов для определения прочности бетона конструкций использовали неразрушающий метод, подразумевающий применение молота Шмидта (ОМШ). Для определения градуировочной зависимости «прочность – величина отскока» в 19 точках определили прочность бетона методом отрыва со скалыванием с использованием прибора ПБЛР. Требуется построить градуировочную зависимость.

**Решение.** Установление градуировочной зависимости осуществляют в соответствии с ГОСТ 17624-2012 по уравнению вида

$$R = a \cdot T + b, \quad (1-3)$$

где  $R$ — прочность бетона на сжатие, МПа;

$T$ — косвенная характеристика, выраженная величиной отскока прибора ОМШ.

Коэффициенты  $a$  и  $b$  вычисляют по формулам:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{\phi,i} - R_{\phi})(T_i - T)}{\sum_{i=1}^n (T_i - T)^2}, \quad (1-4)$$

$$b = R_{\phi} - a \cdot T, \quad (1-5)$$

где  $n$ — число образцов;

$R_{\phi,i}$ — прочность бетона  $i$ -го образца, определенная при испытании, МПа;

$R_{\phi}$ — среднее значение прочности бетона, МПа;

$T_i$ — величина упругого отскока в  $i$ -ом образце;

$T$ — среднее значение величины упругого отскока.

Заносим результаты измерений и первичной обработки в Таблица 1-2

Таблица 1-2.

### Обработка данных

№ п.п ,	Отскок [Т]	$T_{cp}$	$T_i - T_{cp}$	$(T_i - T_{cp})^2$	Прочность $R_{\phi,i}$ , МПа	$R_{\phi,cp}$ , МПа	$R_{\phi,i} - R_{\phi,cp}$	$(T_i - T_{cp}) * (R_{\phi,i} - R_{\phi})$
1	33	39	-5,89	35	27,7	35,4	-7,7	45,57
2	44		5,11	26	42,3		6,9	35,06
3	42		3,11	10	39,5		4,1	12,63
4	40		1,11	1	36,7		1,3	1,401
5	35		-3,89	15	28,8		-6,6	25,82
6	34		-4,89	24	26,0		-9,4	46,16
7	43		4,11	17	42,9		7,5	30,66
8	36		-2,89	8	32,2		-3,2	9,35
9	46		7,11	50	45,1		9,7	68,69
10	36		-2,89	8	32,2		-3,2	9,35
11	46		7,11	50	45,1		9,7	68,69
12	46		7,11	50	46,8		11,4	80,77

№ п.п.	Отскок [Т]	$T_{cp}$	$T_i - T_{cp}$	$(T_i - T_{cp})^2$	Прочность $R_{\phi i}$ , МПа	$R_{\phi, cp}$ , МПа	$R_{\phi i} - R_{\phi, cp}$	$(T_i - T_{cp}) * (R_{\phi i} - R_{\phi})$
13	46		7,11	50	46,2		10,8	76,51
14	41		2,11	4	40,0		4,6	9,61
15	35		-3,89	15	28,2		-7,2	28,16
16	32		-6,89	48	24,3		-11,1	76,74
17	38		-0,89	1	35,5		0,1	-0,06
18	38		-0,89	1	33,9		-1,5	1,37
19	28		-10,89	119	19,8		-15,6	170,3
				534			796,86	

Отсюда определяем коэффициенты  $a$  и  $b$ :

$$a = \frac{796,86}{534} = 1,493,$$

$$b = 35,4 - 1,42011 \cdot 39 = -22,632.$$

Производим отбраковку аномальных значений, заполняя Таблица 1-3

Таблица 1-3

### Отбраковка результатов

№ п.п.	Отскок [Т]	Прочность $R_{\phi i}$ , МПа	Градуировка $R_{ни}$ , МПа	$R_{\phi i} - R_{ни}$	$(R_{\phi i} - R_{ни})^2$	$S$	$(R_{\phi i} - R_{ни})/S$
1	33	27,7	26,6	1,1	1,1	1,051 1	1,02
2	44	42,3	43,1	-0,8	0,6		0,72
3	42	39,5	40,1	-0,6	0,3		0,54
4	40	36,7	37,1	-0,4	0,1		0,36
5	35	28,8	29,6	-0,8	0,7		0,78
6	34	26,0	28,1	-2,1	4,5		2,02
7	43	42,9	41,6	1,3	1,8		1,27
8	36	32,2	31,1	1,1	1,2		1,04
9	46	45,1	46,0	-0,9	0,9		0,89
10	36	32,2	31,1	1,1	1,2		1,04
11	46	45,1	46,0	-0,9	0,9		0,89
12	46	46,8	46,0	0,8	0,6		0,72
13	46	46,2	46,0	0,2	0,0		0,15
14	41	40,0	38,6	1,4	2,0		1,36
15	35	28,2	29,6	-1,4	2,0		1,35
16	32	24,3	25,1	-0,8	0,7		0,80
17	38	35,5	34,1	1,4	2,0		1,34
18	38	33,9	34,1	-0,2	0,0		0,19
19	28	19,8	19,2	0,6	0,4		0,60

Отбраковываем те из значений, что не удовлетворяют условию:

$$\frac{|R_{\phi,i} - R_{n,i}|}{S} < 2, \quad (1-6)$$

где  $S$  — остаточное среднеквадратическое отклонение, определяемое по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_{\phi,i} - R_{\phi})^2}{n-2}}. \quad (1-7)$$

Проверяем применимость градуировочной зависимости, определив коэффициент корреляции по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{n,i} - R_n) \cdot (R_{\phi,i} - R_{\phi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{n,i} - R_n)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{\phi,i} - R_{\phi})^2}} > 0,7. \quad (1-8)$$

Для упрощения расчета заполним *Таблица 1-4*

*Таблица 1-4*

### Отбраковка результатов

№ п,п,	$R_{Hi},$ МПа	$R_{H,CP},$ МПа	$R_{Hi}$ $- R_{H,CP}$	$(R_{Hi}$ $- R_{H,CP})^2$	$R_{\phi i}$ $- R_{\phi,CP}$	$(R_{\phi i}$ $- R_{\phi,CP})^2$	$(R_{Hi} - R_{H,CP})$ $* (R_{\phi i}$ $- R_{\phi,CP})$
1	26,6	35,4	-8,8	77,4	-7,7	59,78	68,04
2	43,1		7,6	58,1	6,9	47,18	52,35
3	40,1		4,6	21,5	4,1	16,55	18,86
4	37,1		1,6	2,7	1,3	1,61	2,09
5	29,6		-5,8	33,8	-6,6	43,98	38,56
6	28,1		-7,3	53,4	-9,4	88,95	68,92
7	41,6		6,1	37,6	7,5	55,78	45,77
8	31,1		-4,3	18,7	-3,2	10,44	13,96
9	46,0		10,6	112,5	9,7	93,48	102,55
10	31,1		-4,3	18,7	-3,2	10,44	13,96
11	46,0		10,6	112,5	9,7	93,48	102,55
12	46,0		10,6	112,5	11,4	129,24	120,59
13	46,0		10,6	112,5	10,8	115,96	114,22
14	38,6		3,1	9,9	4,6	20,87	14,36
15	29,6		-5,8	33,8	-7,2	52,30	42,05
16	25,1		-10,3	105,9	-11,1	123,91	114,57
17	34,1		-1,3	1,8	0,1	0,00	-0,09
18	34,1		-1,3	1,8	-1,5	2,35	2,05
19	19,2		-16,3	264,5	-15,6	244,35	254,23

№ п,п,	$R_{Hi}$ , МПа	$R_{H,cp}$ , МПа	$R_{Hi}$ – $R_{H,cp}$	$(R_{Hi}$ – $R_{H,cp})^2$	$R_{\phi i}$ – $R_{\phi,cp}$	$(R_{\phi i}$ – $R_{\phi,cp})^2$	$(R_{Hi} - R_{H,cp})$ * $(R_{\phi i}$ – $R_{\phi,cp})$
				1189,6		1210,64	1189,6

$$r = 0,991 > 0,7$$

$$\frac{S}{R_{\phi}} = 2,96\% < 15\%.$$

Следовательно, оценка прочности по установленной градуировочной зависимости допускается. Графическое представление градуировочной зависимости выглядит следующим образом:

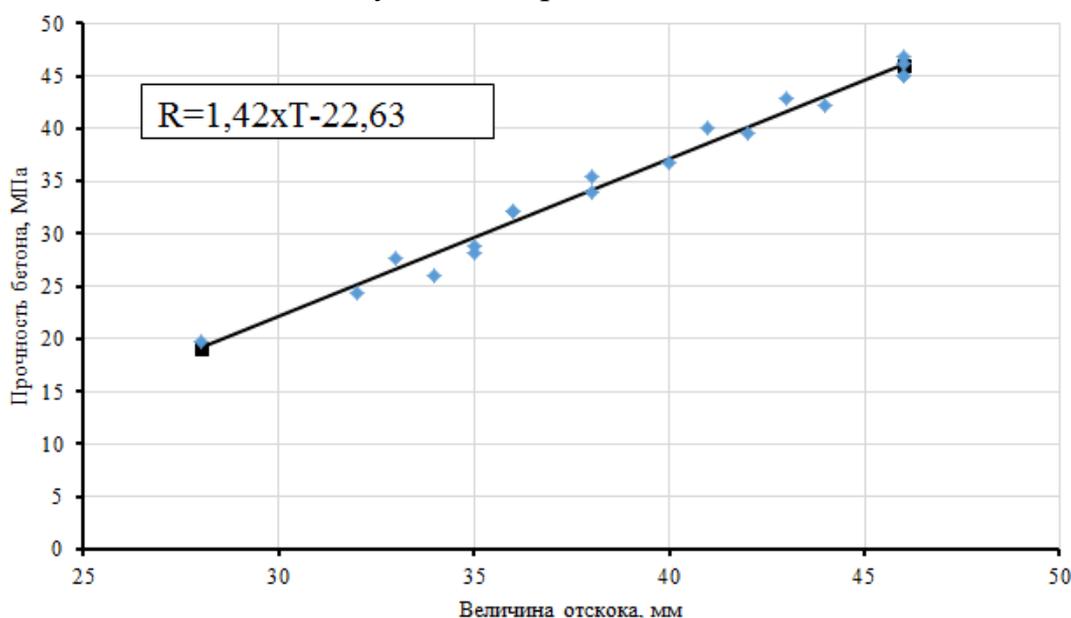


Рисунок 1.2 Установленная градуировочная зависимость.

#### Задача 1.1.4. Определение прочности бетона конструкции.

На строительной площадке в процессе возведения монолитного здания с целью контроля качества конструкций, после полного набора прочности материалом выполняют испытания ударно-импульсным методом. Используется прибор Оникс 2.5, которым определяют среднюю прочность на сжатие материала монолитной конструкции.

Определение прочности бетона ударно-импульсным методом проводят, соблюдая требуемые стандартом условия, в следующем порядке:

1. Выбрать участок на поверхности бетона размером не менее 100 × 100 мм, без наплывов бетона и с малым количеством пор на поверхности. В случае

отсутствия такого участка выровнять испытываемую поверхность с помощью наждачного камня.

2. Провести серию измерений, включающую не менее 10 ударов.

3. Определить прочность бетона  $R$  в конструкции (по предварительно уточненной градуировочной зависимости) по измеренной «ударной твердости»  $H$ . Результаты записать в Таблица 1-5

Прочность бетона на сжатие определяют по градуировочной зависимости:

$$R = a + b \cdot Hi, \quad (1-9)$$

где  $Hi$ — условная характеристика, связанная с поверхностной твердостью и прочностью бетона исследуемой конструкции, МПа;  $a = -7,0$  и  $b=0,5$  — коэффициенты уточненной градуировочной зависимости.

Таблица 1-5

**Результаты испытаний прочности бетонной конструкции ударно-импульсным методом**

№ опыта	Условная характеристика, $H$ , усл.ед	Прочность $R_i$ , МПа	Среднее значение прочности бетона на сжатие, $\bar{R}_{сж}$ , МПа
1	64,2	25,1	22,9
2	60,1	23,05	
3	58,7	22,35	
4	57,7	21,85	
5	62,2	24,1	
6	64,1	25,05	
7	50,4	18,2	
8	53,7	19,85	
9	58,5	22,25	
10	62,2	24,1	
11	64,1	25,05	

№ опыта	Условная характеристика, $H$ , усл.ед	Прочность $R_i$ , МПа	Среднее значение прочности бетона на сжатие, $\bar{R}_{сж}$ , МПа
12	57,4	21,7	
13	59,7	22,85	
14	58,5	22,25	
15	62,2	24,1	
16	60,1	23,05	
17	58,7	22,35	
18	57,7	21,85	
19	62,2	24,1	
20	64,1	25,05	
21	60,1	23,05	
22	58,7	22,35	
23	59,4	22,7	
24	60,1	23,05	
25	58,7	22,35	
26	57,7	21,85	
27	62,2	24,1	
28	64,1	25,05	
29	60,1	23,05	
30	58,7	22,35	

Среднее значение прочности бетона в конструкции определяется по формуле:  $\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}$ , МПа .

**Задача 1.1.5.** Определение усилия натяжения в арматуре.

Определить усилие натяжения и напряжения стальной арматуры длиной  $L = 3$  м, диаметром  $d = 4$  мм, если частоты собственных колебаний арматурных стержней соответственно равны:  $f_0(1) = 25$  Гц;  $f_0(2) = 30$  Гц.

**Решение.** Усилие натяжения арматуры можно определить из выражения:

$$F = 4 \cdot L^2 \cdot f_0^2 \cdot m \quad (1-10)$$

где  $m$  – погонная масса стержня, определяемая по формуле:

$$m = \rho \cdot A \quad (1-11)$$

где  $\rho$  – плотность материала арматуры ( $7,8 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{М}^4$ );

$A$  – площадь сечения арматурного стержня,  $\text{м}^2$ .

Напряжение в арматуре определяем по формуле:

$$\sigma = 4 \cdot L^2 \cdot f_0^2 \cdot \rho \quad (1-12)$$

Определяем напряжения в натянутых арматурных стержнях:

$$\sigma(1) = 4 \cdot 3^2 \cdot 25^2 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 175,5 \text{ МПа}$$

$$\sigma(2) = 4 \cdot 3^2 \cdot 30^2 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 251,7 \text{ МПа}$$

Усилия натяжения в арматурных стержнях соответственно равны:

$$F(1) = \sigma(1) \cdot A = 175,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 4^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 27 \text{ кН} \quad (1-13)$$

$$F(2) = \sigma(2) \cdot A = 251,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 4^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 79,3 \text{ кН} \quad (1-14)$$

## 1.2. Тензометрические методы экспериментальных исследований

### *Теоретические сведения.*

Тензорезистор – это первичный преобразователь, предназначенный для измерения деформаций. Принцип работы тензорезисторов основан на свойстве проводниковых или полупроводниковых материалов изменять омическое сопротивление при его деформировании. Это свойство называется тензоэффектом.

Важнейшей характеристикой тензорезисторов является коэффициент тензочувствительности  $K_T$ , который представляет собой отношение относительного изменения сопротивления к его относительной деформации.

$$k_T = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}$$

где  $\Delta R/R$  – относительное изменение сопротивления;

$\Delta l/l$  – относительное изменение деформации ( $\epsilon$ );

$k_T$  – коэффициент тензочувствительности.

Тензорезисторы изготавливают из материалов с высоким удельным сопротивлением. Для тензосплавов  $k_T$  изменяется в пределах от  $-12$  до  $+6,5$ , а для полупроводников достигают от 150 до 200.

Наибольшее распространение получили проволочные и фольговые тензорезисторы. Петлевой проволочный тензорезистор (Рисунок 1.3) представляет собой несколько петель микропровода, прикрепленных клеем к пленочной или бумажной основе (подложке), являющейся диэлектриком.



Рисунок 1.3 Схема (а) и общий вид (б) петлевого проволочного тензорезистора: 1 – основа тензорезистора; 2 – микропровод (тензочувствительный элемент); 3 – контактные провода (медные); l – база тензорезистора

Микропровод, используемых, выполнен из константана (сплав меди и никеля), диаметром 12-30мкм. База таких тензорезисторов – от 5 до 100мм. К достоинствам петлевых проволочных тензорезисторов следует отнести простоту подготовки к проведению эксперимента, значительный диапазон баз, возможность использования в широком диапазоне температур, (от  $-200^\circ$  до  $+100^\circ$ ) и др., к недостаткам – наличие поперечной чувствительности (частичное изменение сопротивления тензорезистора, при его деформировании в поперечном направлении).

В целях уменьшения погрешностей от поперечной чувствительности были разработаны беспетлевые (решетчатые) проволочные тензорезисторы (Рисунок 1.4). К достоинствам беспетлевых проволочных тензорезисторов следует отнести низкую поперечную чувствительность.

Наиболее универсальными являются фольговые тензорезисторы (Рисунок 1.5), которые выполняются из тонкой тензофольги толщиной 2-5мкм фотолитографическим способом.

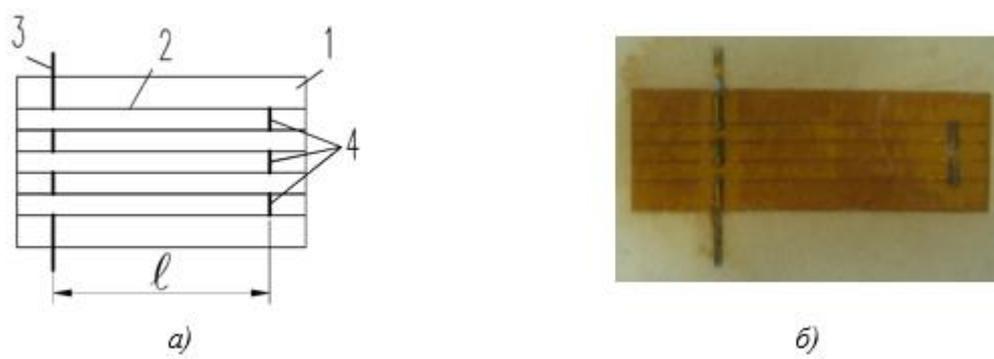


Рисунок 1.4 Схема (а) и общий вид (б) беспетлевого проволочного тензорезистора: 1 – основа тензорезистора; 2 – микропровод (тензочувствительный элемент); 3 – контактные провода; 4 – медные перемычки;  $l$  – база тензорезистора.

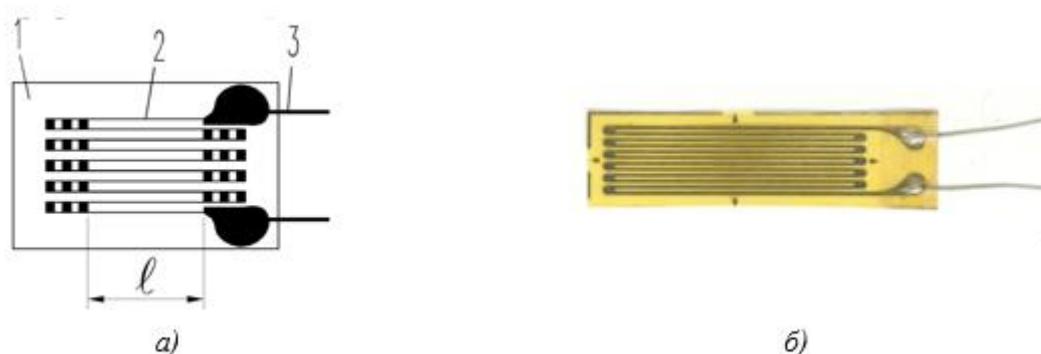


Рисунок 1.5 Схема (а) и общий вид (б) фольгового тензорезистора: 1 – основа тензорезистора; 2 – микропровод (тензочувствительный элемент); 3 – контактные провода;  $l$  – база тензорезистора.

В качестве подложки у таких тензорезисторов используется пленочная или бумажная основа. Достоинства – низкая поперечная чувствительность; высокая технологичность изготовления; возможность получения тензорешетки любой формы, возможность изготовления тензорезисторов практически любой базы (от 0,2 до 100мм), измерение деформаций в зонах с высоким градиентом на малых базах, измерение больших пластических деформаций, деформаций как при статических, повторных, так и при высоких скоростях нагружения.

Полупроводниковые тензорезисторы (Рисунок 1.6) изготавливаются путем электрической резки монокристаллов германия, кремния, висмута и др. В основном полупроводниковые тензорезисторы имеют следующие размеры: толщина 0,01-0,02мм, ширина 0,5-1,0мм, длина 2-15мм.



Рисунок 1.6 Схема (а) и общий вид (б) полупроводникового тензорезистора: 1 – контактные провода;  $l$  – база тензорезистора.

К достоинствам таких тензорезисторов следует отнести высокую тензочувствительность ( $k_T = 150 - 200$ ). К недостаткам – зависимость коэффициента тензочувствительности от температуры и деформации, а также высокую хрупкость и измерение относительно малых деформаций. Указанные недостатки определяют область применения таких тензорезисторов, как чувствительных элементов специальных преобразователей (датчиков) усилий, давлений, динамических перемещений.

Для определения значения коэффициента тензочувствительности проволочные и фольговые тензорезисторы подвергают градуировке. Тензорезисторы тарируют выборочно 5-7% из партии.

Градуировка производится с помощью упругих элементов, деформации которых определяются аналитически, а изменение сопротивления тензорезисторов – экспериментально.

$$k_T = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_Z}$$

В качестве эталонного упругого элемента, обеспечивающего деформирование тензорезисторов, используется балка с зоной чистого изгиба (Рисунок 1.7) или консоль равного сопротивления (Рисунок 1.8).

Балка с зоной чистого изгиба имеет участок, где деформации по длине балки постоянны и рассчитываются по формуле:

$$\varepsilon_Z = \frac{\sigma_Z}{E} = \frac{6Pa}{EBh^2}$$

где  $P$  – величина приложенной силы;

$a$  – расстояния от опоры балки до точки приложения нагрузки;

$E$  – модуль упругости материала градуировочной балки;

$B$  – ширина градуировочной балки;

$h$  – толщина градуировочной балки.

Или по формуле, через величину прогиб балки в середине пролета:

$$\varepsilon_Z = \frac{12h}{3 \cdot L^2 - 12 \cdot a \cdot (L - a)} \cdot \Delta f$$

где  $h$  – толщина градуировочной балки;  $L$  – длина балки;  $a$  – расстояния от опоры балки до точки приложения нагрузки;  $\Delta f$  – прогиб балки в середине пролета.

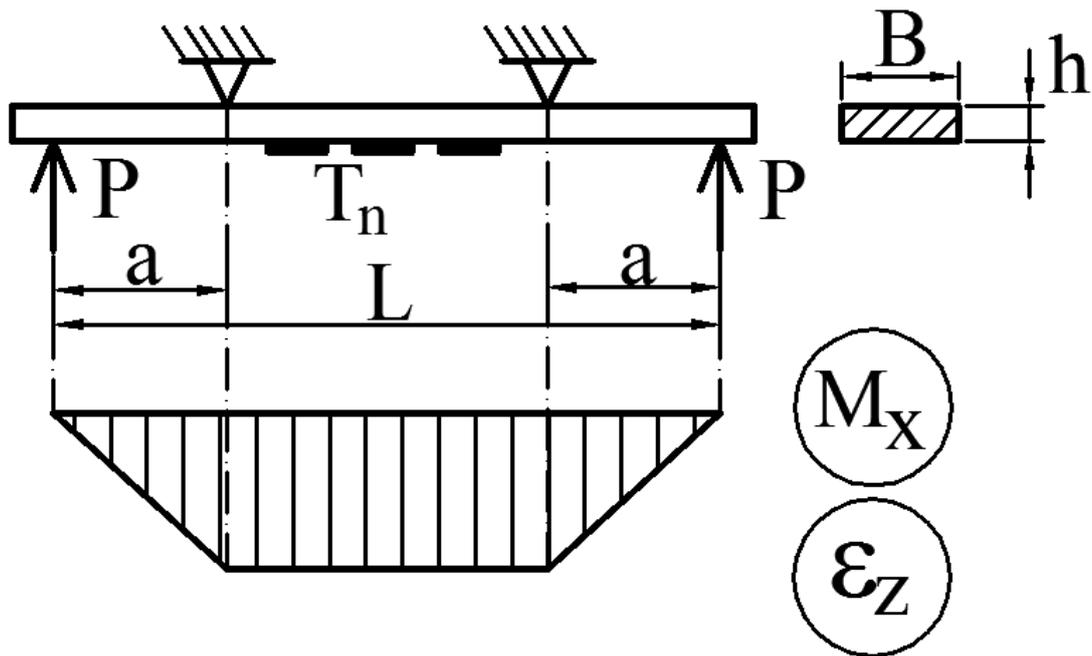


Рисунок 1.7 Схема балки с зоной чистого изгиба:  $T_n$  – тензорезисторы в растянутой зоне

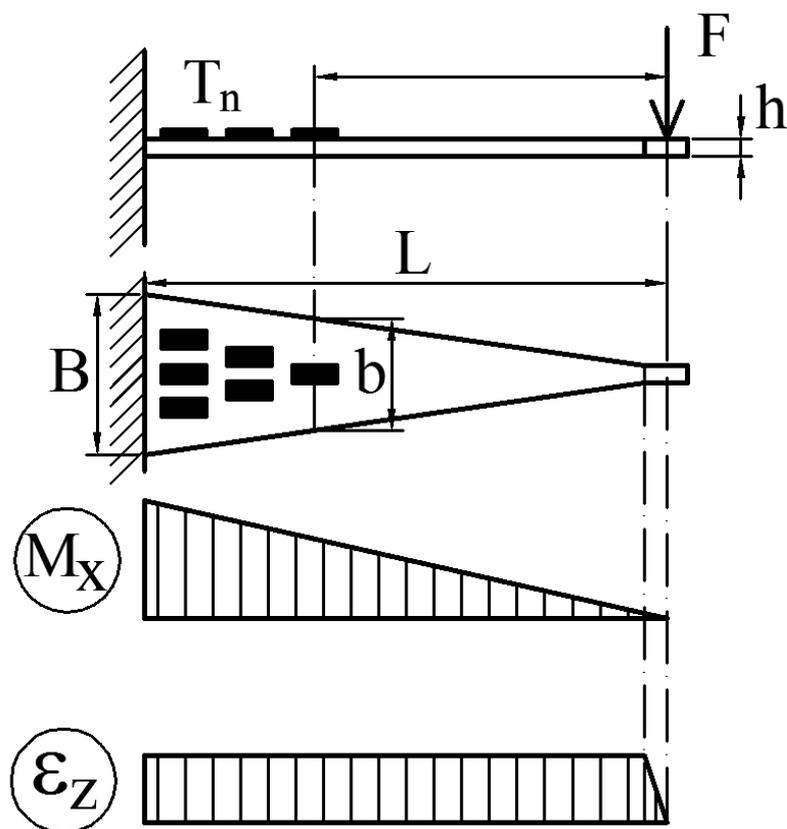


Рисунок 1.8 Схема консольной балки равного сопротивления:  $T_n$  – тензорезисторы в растянутой зоне

Ширина консоли равного сопротивления увеличивается от свободного края к заделке линейно. Так как изгибающий момент  $M_x$  от силы  $F$  также возрастает линейно, то деформации на поверхности консоли по всей ее длине будут постоянны и могут быть определены по формуле:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{6FL}{EBh^2} \quad (1-15)$$

где  $F$  – величина приложенной силы;  $L$  – длина градуировочной балки;  $B$  – ширина балки в заделке;  $h$  – толщина балки;  $E$  – модуль упругости материала балки.

Осредненное по результатам испытаний значение коэффициента тензочувствительности  $k_T$  присваивается всей партии.

### Задача 1.2.1. Градуировка тензорезисторов.

При градуировке партии тензорезисторов на консоли равного сопротивления с помощью тензометрической аппаратуры получены результаты, приведенные в Таблица 1-6.

Таблица 1-6

**Экспериментальные данные**

Показания прибора № этапа нагружения	Нагрузка на консоль, Н	Показания по прибору
1	0	1038
2	10	1092
3	20	1147
4	10	1093
5	0	1039

Необходимо определить коэффициент тензочувствительности тензорезисторов ( $k_T$ ), если известно, что цена деления тензорезистора в единицах  $\Delta R/R$ ,  $c = 4 \cdot 10^{-6}$ . Модуль упругости тарировочной консоли  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, а схема балки приведена на Рисунок 1.9.

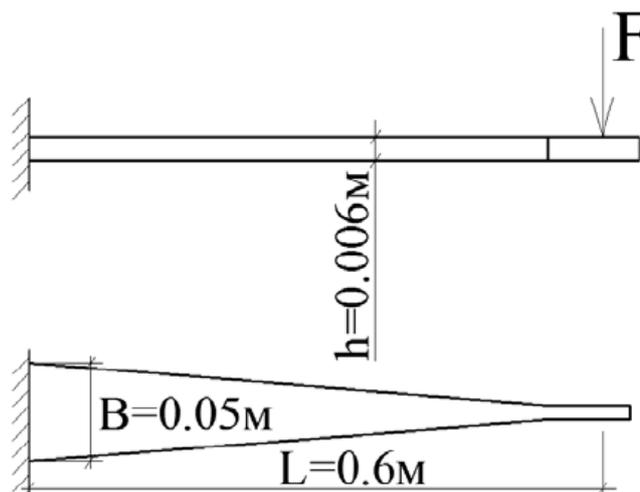


Рисунок 1.9 Схема консоли равного сопротивления (точность изготовления  $\pm 0,01$  м)

**Решение.** Коэффициент тензочувствительности тензорезисторов определяется по формуле:

$$k_T = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_z}, \quad (1.1)$$

где  $\Delta R/R$  — среднее значение относительного изменения сопротивления тензорезисторов;  $\varepsilon_z$  — относительная линейная деформация поверхности балки, на которой наклеены тензорезисторы (определяется расчетным путем).

Для консоли равного сопротивления значение относительной деформации для приращения нагружения 10 Н определяют по формуле  
**Ошибка! Источник ссылки не найден.:**

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} = \frac{6FL}{EBh^2} = \frac{6 \cdot 10 \cdot 0,6}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,006^2 \cdot 0,05} = 95,2 \cdot 10^{-6}.$$

С использованием приведенных формул заполняем Таблица 1-7.

Таблица 1-7

### Обработка результатов испытаний

№ этапа нагружения	Нагрузка на консоль, Н	Разность показаний по прибору	Среднее значение разности показаний по прибору	Среднее значение относительного сопротивления $\Delta R/R$
1	0	54	54,25	$54,25 \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 217 \cdot 10^{-6}$
2	10	55		
3	20	54		
4	10	54		

Таким образом, коэффициент тензочувствительности по (1.1) равен:

$$k_T = \frac{217 \cdot 10^{-6}}{95,2 \cdot 10^{-6}} = 2,3.$$

**Ответ:** коэффициент тензочувствительности, определенный с помощью консольной балки равного сопротивления, составил 2,3.

**Задача 2.2.** Определение несущей способности.

Выполнить проверку прочности консольной балки двутаврового сечения № 18, если известно, что при испытаниях этой балки сосредоточенной силой  $F=4$  кН в нижнем волокне около заземления измеренная деформация составила  $\varepsilon = -21,5 \cdot 10^{-5}$ . Предполагаемая нагрузка  $F_{\max} = 20$  кН. Геометрические характеристики двутавра №18  $I_x = 1290 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ ,  $W_x = 143 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Коэффициент

условий работ  $\gamma_c=1,0$ , расчетное сопротивление стали  $R_y=250$  МПа. Расчетная схема представлена на Рисунок 1.10.

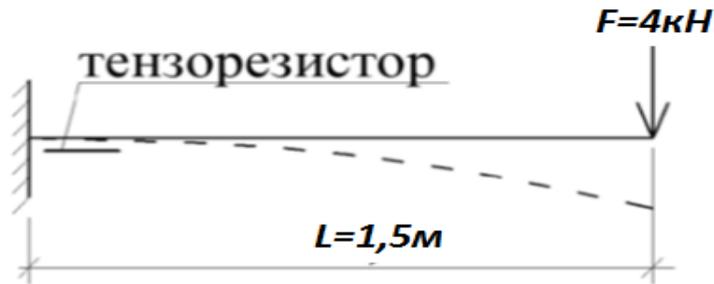


Рисунок 1.10 Расчетная схема натурального испытания

**Решение.** Условие прочности упругой балки, работающей на изгиб, представлено в формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq R_y \cdot \gamma_c \quad (1-16)$$

В результате натуральных испытаний следует определить коэффициент конструктивной поправки для консольной балки. Для этого находим теоретическое и экспериментальное значение максимальных напряжений при испытательной нагрузке  $F = 4$  кН.

Теоретическое значение определяем по формуле:

$$\sigma^{\text{теор}} = \frac{FL}{W_x} = 4000 \cdot 1,5 / (143 \cdot 10^{-6}) = 41,96 \text{ МПа} \quad (1-17)$$

Экспериментальное значение напряжения определяют по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma^{\text{эксп}} &= \varepsilon \cdot E = -21,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \\ &= -45,15 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (1-18)$$

Конструктивную поправку для вычисления напряжений определяют по формуле:

$$k_\sigma = \frac{\sigma^{\text{эксп}}}{\sigma^{\text{теор}}} = \frac{45,15}{41,96} = 1,076 \quad (1-19)$$

Определяем величину максимальных нормальных напряжений при предполагаемой нагрузке  $F_{\max}=20$ кН:

$$\sigma_{\max} = F_{\max} \cdot L \cdot \frac{k_{\sigma}}{W_x} = 20000 \cdot 1,5 \cdot \frac{1,076}{143} \cdot 10^{-6} \quad (1-20)$$

$$= 225,75 \text{ МПа}$$

Проверяем условие прочности консольной балки:

$$\sigma_{\max} = 225,75 \text{ МПа} < 250 \text{ МПа} = R_y \cdot \gamma_c.$$

Условие выполняется, следовательно, прочность консольной балки обеспечена.

**Задача 2.3.** Определение прогиба балки.

Определить величину нагрузки и вызванный этой нагрузкой максимальный прогиб стальной балки, если измерена относительная деформация ( $\varepsilon=80 \cdot 10^{-5}$ ) в крайнем нижнем волокне балки в сечении, где приложена сосредоточенная сила  $F$ , модуль упругости стали  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ . Расчетная схема представлена на рисунке 2.9, где  $L=2,0\text{ м}$ ;  $h = 0,08 \text{ м}$   $b=0,02 \text{ м}$ .

**Решение.** Для однопролетной балки с шарнирным опиранием, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета, максимальные напряжения определяются из выражения:

$$\sigma_{\max} = \frac{FL}{4W_x} \quad (1-21)$$

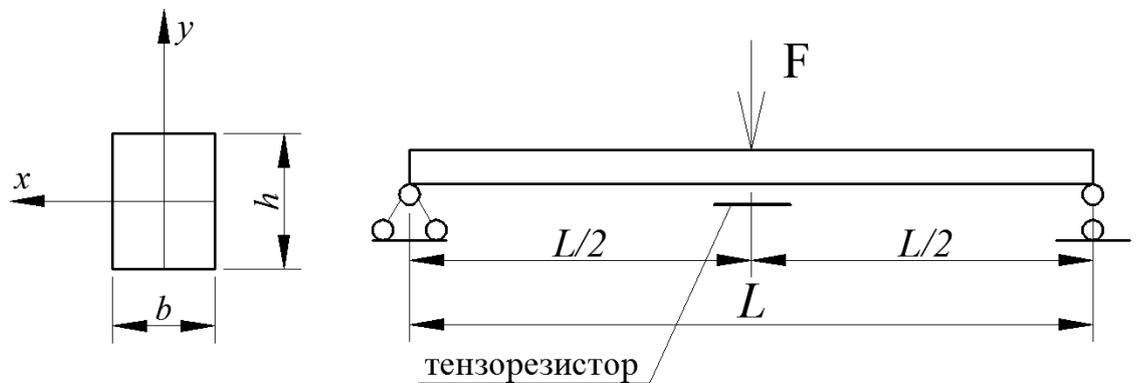


Рисунок 1.11 Схема нагружения балки.

Согласно **Ошибка! Источник ссылки не найден.**) нагрузка  $F$  вычисляется по формуле:

$$F = 4 \sigma_{\max} / W_x L \quad (1-22)$$

В конкретном случае величина максимальных нормальных напряжений  $\sigma_{\max}$  определяется по закону Гука для одноосного напряженного состояния по формуле:

$$\sigma_{max} = \varepsilon E \quad (1-23)$$

Для прямоугольного сечения момент сопротивления определяют по формуле:

$$W_x = \frac{bh^2}{6}. \quad (1-24)$$

В результате величина приложенной силы будет равна:

$$F = \frac{4\varepsilon E W_x b h^2}{6L} = \frac{23 \cdot 0,02 \cdot 0,082 \cdot 80 \cdot 10 - 5 \cdot 2,1 \cdot 1011}{2} = 7,168 \text{ кН} \quad (1-25)$$

Значение максимального прогиба для балки с шарнирным опиранием, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета, определяют по формуле:

$$f_{max} = \frac{FL^3}{48EI_x}. \quad (1-26)$$

Значение величины момента инерции для прямоугольного сечения определяют по формуле:

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (1-27)$$

Отсюда величина прогиба будет равна:

$$f_{max} = FL^3 \cdot \frac{12}{48 E b h^3} = \frac{FL^3}{4 E b h^3} = 7168 \cdot 23 / (4 \cdot 2,1 \cdot 1011 \cdot 0,02 \cdot 0,083) = 0,0067 \text{ м.}$$

#### Задача 2.4. Построение линии влияния.

Тензорезистор, наклеенный в середине пролета шарнирно опертого монорельсового пути на нижнем растянутом волокне при перемещении груза в положении  $L/4$ ;  $L/2$ ;  $3L/4$ , изменял свои показания в соответствии с Таблица 1-8.

Таблица 1-8

#### Данные по тензорезисторам при испытании

Положение груза	$F=0$	$F= F$
$L/4$	3250	3275
$L/2$	3250	3300
$3L/4$	3250	3275

Момент сопротивления сечения монорельса  $W_x=67,7 \text{ см}^3$ , модуль упругости стали  $E=2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ . Цена деления измерительного моста в единицах  $(\Delta Q/R)$   $c=10^{-5}$ , коэффициент тензочувствительности тензорезистора  $k_T=2,0$ . Построить линию влияния изгибающего момента монорельсового пути для сечения, в котором находится тензорезистор. Расчетная схема монорельсового пути представлена на Рисунок 1.12.

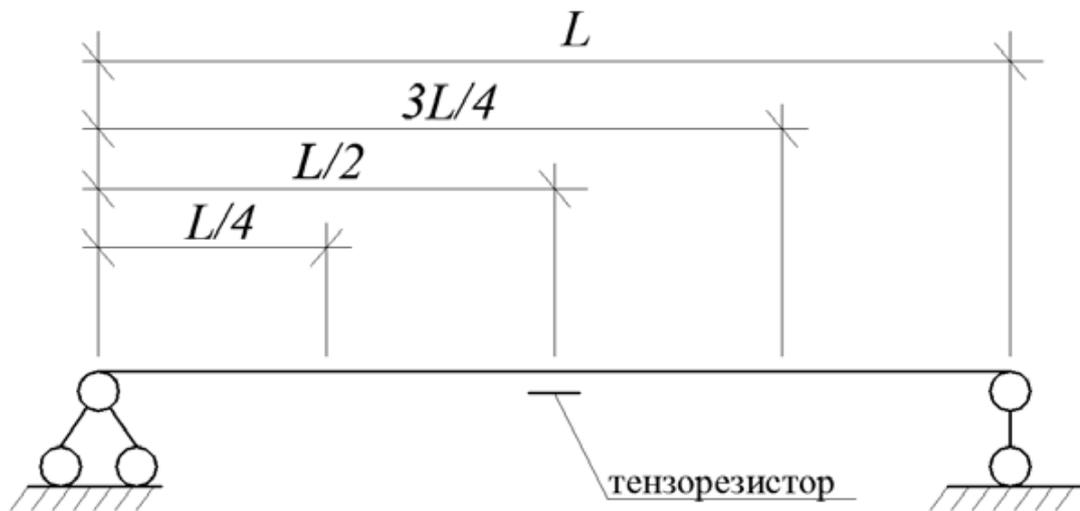


Рисунок 1.12 Расчетная схема монорельсового пути.

Для построения линии влияния изгибающего момента в середине пролета вычисляем их значения для случаев, когда груз находится в  $(L/4)$  пролета,  $(L/2)$  и  $(3L/4)$ , по формуле:

$$M = \varepsilon E W_x = (\Delta c / k_T) \cdot \quad (1-28)$$

где  $\Delta$ — разность показаний измерения по прибору.

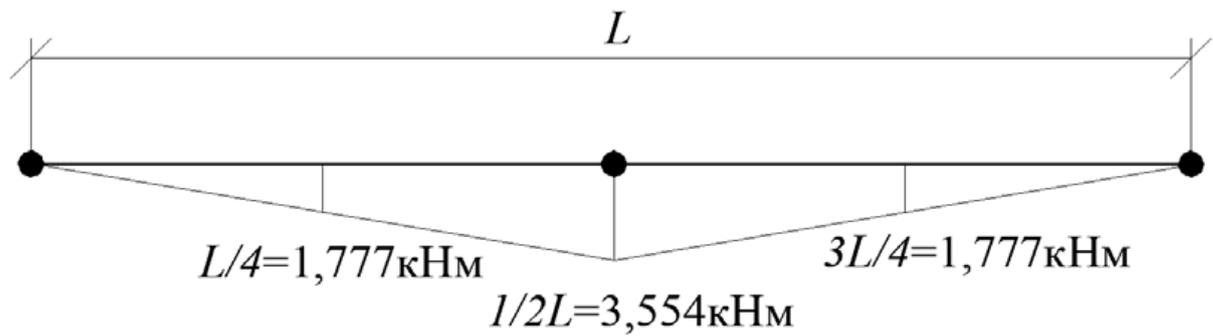
Определяем фактическое значение моментов:

$$M^{(L/4)} = (3275 - 3250) \cdot 10^{-5} / 2,0 \cdot (2,1 \cdot 10^{11} \cdot 67,7 \cdot 10^{-6}) = 1,777 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M^{(L/2)} = (3300 - 3250) \cdot 10^{-5} / 2,0 \cdot (2,1 \cdot 10^{11} \cdot 67,7 \cdot 10^{-6}) = 3,554 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M^{(3L/4)} = (3275 - 3250) \cdot 10^{-5} / 2,0 \cdot (2,1 \cdot 10^{11} \cdot 67,7 \cdot 10^{-6}) = 1,777 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

По полученным результатам строим линию влияния изгибающего момента для середины пролета монорельсового пути (Рисунок 1.13).



*Рисунок 1.13 Линия влияния для середины пролета*

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:**

1. Что такое тензорезистор?
2. Виды тензорезисторов.
3. Как определяется коэффициент тензочувствительности?
4. Как строится линия влияния момента с помощью тензорезисторов?
5. Что такое конструктивная поправка и как она определяется?
6. Сформулируйте условие прочности консольной балки.

## **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ И КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

### **2.1. Применение акустических методов для исследования свойств материалов строительных конструкций**

*Теоретические сведения.*

Акустический метод исследования строительных материалов, получивший наиболее широкое распространение, основан на использовании закономерности распространения упругих волн в материале.

Акустический метод может применяться самостоятельно и в комплексе с другими методами. Как самостоятельное средство этот метод применяется для оценки однородности материала конструкций, определения коэффициента Пуассона, изучения процессов структурных изменений в несущих конструкциях под воздействием нагрузок или внешней среды, установления прочности материалов (тяжелого бетона, тяжелых естественных камней), определения наличия и зоны распространения дефектов в конструкциях (трещины, пустоты, инородные включения и пр.).

В комплексе с другими методами акустический метод применяется для определения модуля упругости материала и прочности легких каменных материалов в конструкциях (керамзитобетон, шлакобетон, кирпич, кирпичная кладка и пр.).

С помощью указанного метода может быть установлена прочность материала по корреляции между прочностью и его физическими характеристиками - скоростью распространения упругих волн, акустическим сопротивлением или акустической жесткостью среды. Для бетона и его аналогов (газобетона, керамзитобетона и шлакобетона) указанные зависимости уже установлены. Возможность применения метода для определения прочности кирпичной кладки до настоящего времени исследована недостаточно полно.

Акустические методы исследования строительных материалов

Акустические методы основаны на регистрации параметров упругих колебаний, возбужденных в контролируемой конструкции. Колебания возбуждаются обычно в ультразвуковом диапазоне (что уменьшает помехи) с помощью пьезометрического или электромагнитного преобразователя, удара по конструкции, а также при изменении структуры самой конструкции вследствие приложения нагрузки.

По частотному диапазону акустические методы делят на ультразвуковые и звуковые, по способу возбуждения упругих колебаний -- на пьезоэлектрические, механические, электромагнитоакустические, самовозбуждения при деформациях. При неразрушающем контроле акустическими методами регистрируют частоту, амплитуду, время, механический импеданс (затухание), спектральный состав колебаний. Применяют продольные, сдвиговые, поперечные, поверхностные и нормальные акустические волны. Режим излучения колебаний может быть непрерывным или импульсным.

В группу акустических методов входят теневой, резонансный, эхо-импульсный, акустической эмиссии (эмиссионный), велосимметрический, импедансный, свободных колебаний.

Теневой метод служит для дефектоскопии и основан на установлении акустической тени, образующейся за дефектом вследствие отражения и рассеяния акустического луча. Резонансный метод применяется для дефектоскопии и толщинометрии. При этом методе определяются частоты, вызывающие резонанс колебаний по толщине исследуемой конструкции.

Импульсный метод (эхо) используется для дефектоскопии и толщинометрии. Устанавливается отраженный от дефектов или поверхности акустический импульс. Эмиссионный метод (метод акустической эмиссии) основан на излучении волн упругих колебаний дефектами, а также участками конструкции при нагружении. Определяются наличие и место дефектов, уровень напряжений. акустический материал дефектоскопия радиационный

Велосимметрический метод основан на фиксации скоростей колебаний, влиянии дефектов на скорость распространения волн и длину пути волн в материале. Импедансный метод основан на анализе изменения затухания волн в зоне дефекта. В методе свободных колебаний анализируется спектр частот собственных колебаний конструкции после нанесения по ней удара.

Разработаны многочисленные приборы, в которых использованы перечисленные выше методы ультразвуковых колебаний. В практике строительных исследований используются приборы ГСП УК14П, Бетон-12, УФ-10 П, УЗД- МВТУ, ГСП УК-ЮП и др. Приборы «Бетон» и УК изготовлены на транзисторах и отличаются небольшой массой и габаритами. Приборы УК фиксируют скорость или время распространения волн.

### **Определение модуля упругости бетона.**

**Модуль упругости бетона** — это коэффициент пропорциональности между нормальным напряжением и соответствующей ему относительной продольной упругомгновенной деформацией при  $\sigma_1 = 0,3 \cdot R_{np}$  при осевом сжатии образцов. Значение начального модуля упругости тяжелого бетона при сжатии и растяжении приведено в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003». Данный СП действующий и обязательных к применению.

Упругие свойства бетона зависят от факторов:

- качества и объемного содержания заполнителей;
- класса материала;
- температуры воздуха и интенсивности радиоактивного излучения;
- влажности среды;
- времени воздействия нагрузки;
- условий твердения смеси; возраста бетона;
- армирования.

Определить модуль упругости можно двумя способами:

- механическим, при котором используются специальные образцы, которые разрушаются в процессе исследования;
- ультразвуковым, при котором не происходит разрушение образцов.

Механическим способом модуль упругости бетона можно определить с помощью тензометров или других приборов, обеспечивающих измерение относительных деформаций с точностью не ниже  $1 \cdot 10^{-5}$ . Допускается использовать проводниковые тензорезисторы, наклеиваемые на поверхность бетона. Интервал рабочих температур помещения, где проводятся испытания от 10 °С до 30 °С.

### **Построение градуировочной зависимости определения прочности бетона. Установление градуировочной зависимости «косвенная характеристика–прочность»**

Применение механических неразрушающих методов контроля прочности бетона всегда сопровождается построением экспериментально установленной градуировочной зависимости (кроме прямых неразрушающих методов). Также допускается проводить экспертную оценку прочности бетона при применении ультразвука с использованием универсальной градуировочной зависимости по ГОСТ 17624-2012.

Для построения градуировочной зависимости или привязки универсальной градуировочной зависимости используют результаты прямых испытаний на сжатие образцов, изготовленных из кернов, отобранных из конструкций, и результаты измерения косвенной характеристики неразрушающего метода, полученные на участках отбора кернов. Допускается замена образцов кернов на прямые неразрушающие методы определения прочности по ГОСТ 22690-2015. Для построения градуировочной зависимости следует иметь не менее 12 параллельных измерений прочности бетона по образцам из кернов и косвенной характеристики, определяемой прибором неразрушающего контроля.

Как правило, для аппроксимации результатов измерения для метода упругого отскока используется линейная зависимость ( $R = a + bX$ ), а для ультразвукового метода, в зависимости от диапазона варьирования прочности, — линейная или экспоненциальная ( $R = a \cdot e^{bx}$ ).

Построенная градуировочная зависимость должна быть проверена согласно указаниям, в соответствии с документами по стандартизации.

**Задача 2.1.** Определение прочности бетона конструкции.

При ультразвуковых испытаниях бетона плиты получили значения времени прохождения ультразвуковых колебаний (схема прозвучивания на Рисунок 2.1). Определить, к какому классу по прочности можно отнести бетон плиты, если градуировочная зависимость «прочность—скорость ультразвука» имеет вид:

$$R=10,1 \cdot 10^{-14} \cdot v^4, \quad (2-1)$$

где  $R$  — нормативная прочность бетона, МПа;  $v$  — скорость ультразвукового импульса, м/с.

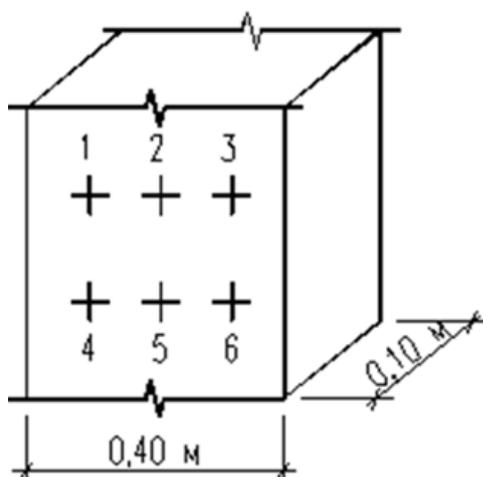


Рисунок 2.1 Схема прозвучивания

В результате прозвучивания были получены следующие значения времени прохождения ультразвука:

$$t_1=24,9 \cdot 10^{-6} \text{ с}; t_2=25,1 \cdot 10^{-6} \text{ с}; t_3=25,0 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$
$$t_4=24,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}; t_5=25,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}; t_6=24,7 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

**Решение.** Фактический класс бетона колонн можно определить по формуле:

$$B^* = \bar{R}(1 - 1,64v), \quad (2-2)$$

где  $\bar{R}$  — средняя прочность бетона;  $v$  — коэффициент вариации.

Средняя прочность бетона определяется по формуле:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} \quad (2-3)$$

Коэффициент вариации определяется по формуле:

$$v = \frac{S_R}{\bar{R}} \quad (2-4)$$

где  $S_R$  — стандарт отклонения прочности бетона, определяемый по формуле:

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R} - R_i)^2}{n - 1}}, \quad (2-5)$$

Результаты вычислений заносим в таблицу, учитывая, что скорость ультразвукового импульса определяют как отношение базы к времени прохождения сигнала, по формуле:

$$V = \frac{b}{t}. \quad (2-6)$$

Таблица 2-1

### Результаты испытания

№ испытания	Скорость ультразвука $V$ , м/с	Прочность бетона по градуировочной зависимости $R_i$ , МПа	Средняя прочность бетона $\bar{R}$ , МПа	$(\bar{R} - R_i)^2$	Стандартное отклонение $S_R$	Коэффициент вариации $v$ , %
1	4016	26,27	26,22	0,0026	0,980	3,7
2	3984	25,45		0,6025		
3	4000	25,86		0,1344		
4	4065	27,58		1,8403		
5	3968	25,04		1,3870		
6	4049	27,14		0,8329		

Определяем фактический класс бетона конструкции:

$$B^* = 26,15(1 - 1,64 \cdot 0,037) = 24,6 \text{ МПа.}$$

В соответствии с табл. 5.1 СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры», принимаем ближайший в сторону запаса существующий класс бетона. Для конкретного случая принимаем класс бетона В20.

**Задача 2.2.** Определение модуля упругости бетона в лабораторных условиях.

В результате обследования железобетонных конструкций одного из объектов выполнили отбор кернов, диаметром 55 мм, для проведения испытаний. С использованием ультразвукового прибора «Бетон-32» определили время прохождения сигнала через образец. Результаты измерений приведены в Таблица 2-2.

Таблица 2-2

**Результаты поверхностного прозвучивания.**

Образец	Длина образца (база прозвучивания) $L$ , мм	Время прохождения УЗИ $t$ , мкс
1	300	71,2
2	290	70,4
3	295	70,5
4	278	71,5
5	315	69,8
6	304	73,2

Требуется определить статический модуль упругости, если плотность бетона  $230 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ .

**Решение.** Скорость прохождения ультразвукового сигнала в материале зависит от его упругих характеристик — плотности  $\rho$  и динамического модуля упругости  $E_{\text{din}}$ . Динамический модуль упругости определяют при деформациях, близких к нулю. Для перехода к расчетному значению статического модуля упругости  $E_{\text{st}}$  используют формулу:

$$E_{\text{st}} = E_{\text{din}} \sqrt{\left(1 - \frac{\sigma}{R_n}\right)} \quad (2-7)$$

где  $\sigma$  — проектный уровень напряжения, МПа;  $R_n$  — нормативное значение прочности бетона, МПа.

Динамический модуль упругости определяют по формуле:

$$E_{\text{din}} = \frac{v^2 \rho}{k}, \quad (2-8)$$

где  $k$  — коэффициент формы образца, учитывающий различия в условиях распространения волн при различной геометрии исследуемого объекта.

Для стержневого элемента, где длина волны ультразвука более чем в 2 раза меньше длины образца ( $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{4000}{60000} = 6,7 \text{ см} < 2 \cdot L = 60 \text{ см}$ ), поэтому  $k=1$ . Определим среднюю скорость распространения ультразвукового импульса:

$$v = \frac{\frac{L_1}{t_1} + \frac{L_2}{t_2} + \frac{L_3}{t_3} + \frac{L_4}{t_4} + \frac{L_5}{t_5} + \frac{L_6}{t_6}}{6} = 4179 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Определим динамический модуль упругости:

$$E_{\text{din}} = 4179^2 \cdot 230 = 40160 \text{ МПа}.$$

Статический модуль упругости определим для интенсивности напряжения  $\sigma = 0,3R$ , в соответствии с п. 5.2 ГОСТ 24452–80:

$$E_{\text{st}} = 40160 \sqrt{(1 - 0,3)} = 3360 \text{ МПа}.$$

**Задача 2.3.** Определение модуля упругости бетона в условиях объекта обследования. По результатам ультразвуковых испытаний бетона сжатой зоны железобетонной балки получено время прохождения ультразвукового сигнала (Рисунок 2.2)  $t = 65,8 \cdot 10^{-6}$  с. Вес балки  $P = 580$  кгс. Требуется определить динамический модуль упругости  $E_{\text{din}}$  бетона балки, если коэффициент поперечной деформации бетона  $\mu = 0,2$ .

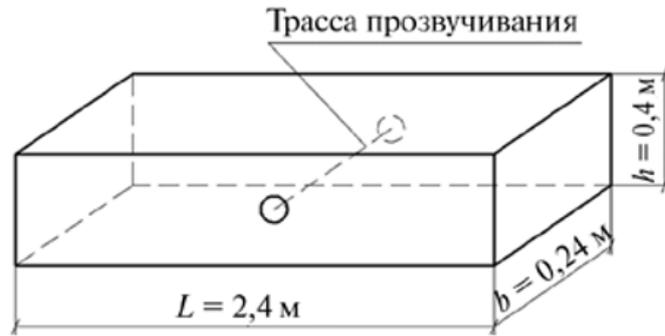


Рисунок 2.2 Исследуемый объект

**Решение.** Динамический модуль упругости бетона определяют по формуле (3.8), но при трехмерной конструкции коэффициент формы образца определяют по формуле:

$$k = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - \mu)} = 0,83. \quad (2-9)$$

Скорость ультразвукового импульса:

$$v = \frac{b}{t} = \frac{0,24}{65,8 \cdot 10^{-6}} = 3647. \quad (2-10)$$

Плотность бетона балки необходимо представить в виде объемного веса:

$$\rho = \frac{P}{L \cdot b \cdot h \cdot g} = \frac{580}{2,4 \cdot 0,24 \cdot 0,4 \cdot 9,8} = 259,6 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4}. \quad (2-11)$$

Определим динамический модуль упругости:

$$E_{\text{din}} = \frac{3647^2}{0,83} = 41170 \text{ МПа.}$$

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какими методами можно определить прочность бетона в лабораторных условиях и на объекте обследования?
2. Для чего применяется градуировочная зависимость?
3. Какой вид имеет градуировочная зависимость при определении прочности бетона методом ультразвуковым методом?
4. Как можно определить модуль упругости бетона?
5. В чем отличие динамического и статического модуля упругости бетона?

## 2.2. Применение акустических методов для дефектоскопии строительных конструкций

### *Теоретические сведения.*

Данные методы основаны на возбуждении упругих механических колебаний. По параметрам этих колебаний и условиям их распространения судят о физико-механических характеристиках и состоянии исследуемого материала.

Колебания могут быть: ультразвуковые методы (с частотой от 20 кГц и выше), звуковые (от 20 до 20 кГц), инфразвуковые (до 20 Гц).

Наибольшее распространение в области обследования и испытания строительных конструкций нашли ультразвуковые колебания. Для возбуждения ультразвуковых волн на поверхность исследуемого материала устанавливают преобразователи электрического тока в механические колебания. Чаще всего они действуют по принципу пьезоэффекта. Поскольку воздушные прослойки препятствуют передаче и приему ультразвуковых колебаний, между преобразователями и исследуемым материалом наносят контактирующую среду; для металла применяют обычно минеральное масло; для бетона и других материалов с неровной поверхностью необходимы — солидол, технический вазелин, эпоксидные смолы.

Ультразвуковые колебания могут быть введены в исследуемую среду узким направленным пучком — «лучом». Они, переходя из одной среды в другую, преломляются, а также отражаются от граней, разделяющих эти среды, в воздушных прослойках почти полностью затухают.

Скорость распространения волн — один из основных показателей при оценке физико-механических характеристик и состояния бетона, древесины и других материалов с переменной плотностью и влажностью.

Ультразвуковые волны отражаются, преломляются и подвергаются дифракции по законам оптики. Эти свойства используют для улавливания колебаний во многих методах неразрушающего контроля. При этом для исследования материала в заданном направлении применяют узконаправленный пучок волн. Положение излучателя и приемника колебаний в зависимости от цели исследования может быть различным по отношению к изучаемой конструкции (



Рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 Схема испытания расположения излучателей и приемников - способом сквозного прозвучивания -а), способом поверхностного прозвучивания - б).

**Задача 2.4.** Определение глубины трещины в железобетонных конструкциях. С использованием ультразвукового прибора выполнили поверхностное прозвучивание участка железобетонной конструкции с трещиной по схеме, указанной на Рисунок 2.4.

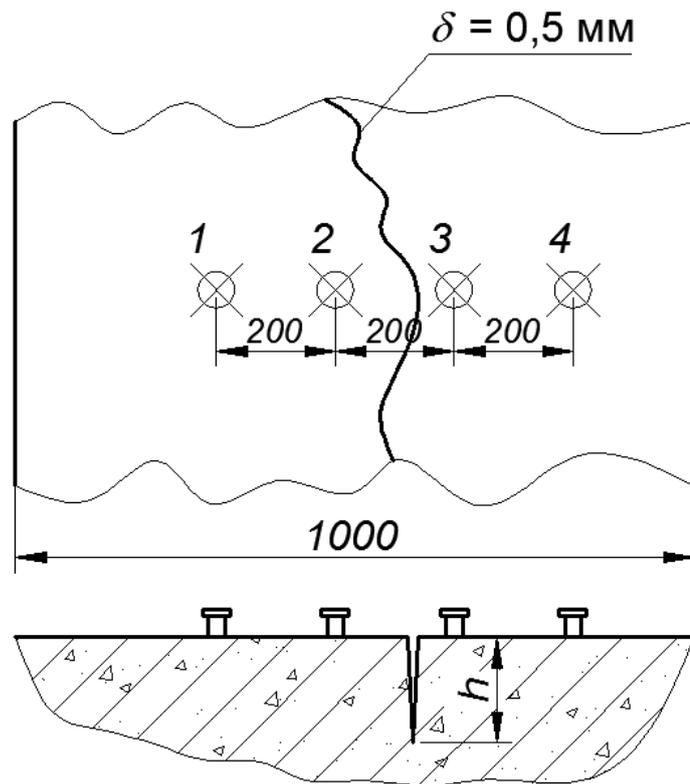


Рисунок 2.4 Схема проведения измерений.

В результате измерений получили следующие значения времени прозвучивания:

$$t_{1-2}=52,5 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$t_{2-3}=67,3 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

$$t_{3-4}=51,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Требуется определить глубину развития трещины.

**Решение.** Законы распространения ультразвукового импульса предусматривают фиксирование регистрирующей аппаратурой первого вступления фронта прямой продольной волны, огибающей основание трещины. Огибание является менее энергозатратным процессом, чем двукратное пересечение границы сред (воздух-бетон) УЗ импульсом, т.е. ультразвук проходит по исследуемому материалу кратчайшим возможным путем, не пересекая трещину, а огибая ее.

В данной задаче глубину трещины определяют по формуле:

$$h = \frac{v}{2} \sqrt{t_1^2 - t^2}. \quad (2-12)$$

где  $v$  — скорость ультразвукового импульса на участке без трещины, м/с;  $t_1$  — время распространения УЗ за данной базе без трещины, с;  $t$  — время распространения УЗ на данной базе через трещину, с.

Скорость ультразвукового импульса на участке без трещин определяем по формуле:

$$v = \frac{\frac{0,2}{t_{1-2}} + \frac{0,2}{t_{3-4}}}{2} = 3843 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (2-13)$$

Определяем глубину трещины:

$$h = \frac{3843}{2} \sqrt{(67,3 \cdot 10^{-6})^2 - \left( \frac{52,5 \cdot 10^{-6} + 51,6 \cdot 10^{-6}}{2} \right)^2} = \quad (2-14)$$

$$= 0,082 \text{ м.}$$

**Задача 2.5.** Обнаружение и локализация дефекта. При дефектоскопии (прибор «Бетон-32» с частотой УЗ сигнала 60 кГц) участка аэродромного покрытия методом поверхностного прозвучивания были получены значения времени прохождения ультразвукового сигнала, приведенные в Таблица 2-3.

Таблица 2-3

### Экспериментальные данные

№ точки прозвучивания	База прозвучивания $L$ , см	Время прохождения ультразвукового импульса $t$ , мкс
1	20	52,3
2	40	104,8
3	60	168,4
4	80	215,9
5	100	335,1
6	120	395,2
7	140	369,2
8	160	418,7

№ точки прозвучивания	База прозвучивания $L$ , см	Время прохождения ультразвукового импульса $t$ , мкс
9	180	469,8
10	200	528,5

Необходимо построить годограф времени прохождения ультразвука и выполнить анализ полученных данных.

**Решение.** Выполняем построение годографа скорости (Рисунок 2.5) по полученным значениям в табл. 4.1.

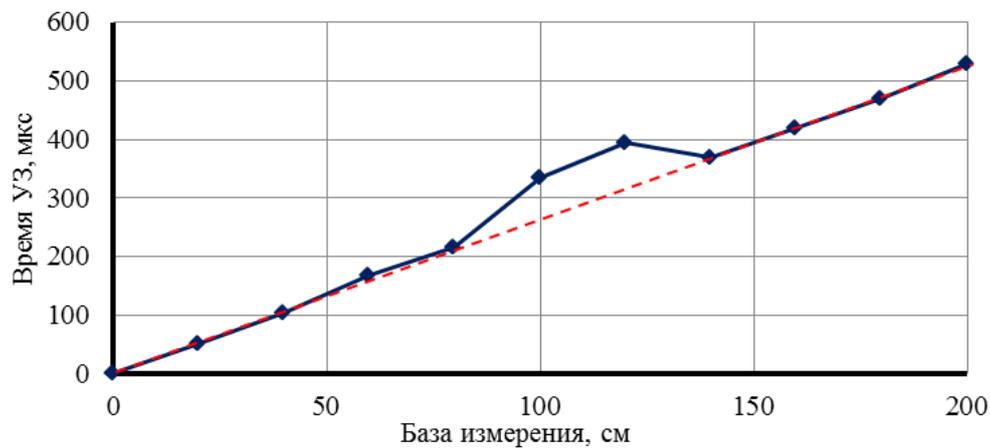


Рисунок 2.5 Годограф времени прохождения ультразвука

Анализ годографа скорости ультразвука показывает, что на исследуемом двухметровом участке аэродромного покрытия имеется дефектная зона размером около 60 см.

При этом максимальную примерную глубину расположения дефекта ( $h$ ) определяют по формуле:

$$h \approx 1,5 \cdot \lambda = 1,5 \frac{v}{f}, \quad (2-15)$$

где  $\lambda$  — длина ультразвуковой волны, м;  $v$  — скорость ультразвукового импульса в материале, м/с;  $f$  — частота ультразвукового импульса, Гц.

$$h = 1,5 \frac{528,5 \cdot 10^{-6}}{60000} = 0,095 \text{ м} \approx 10 \text{ см},$$

Снижение скорости ультразвукового импульса на расстоянии от 80 до 140 см от начала прозвучивания позволило сделать заключение о том, что на этом

участке имеется зона поврежденного бетона (наличие непровибрированного, замороженного бетона, бетона с более низкой прочностью или с наличием дефекта). На данном участке следует локализовать дефект и выполнить ремонтно-восстановительные работы.

**Задача 2.6.** Определение толщины поврежденного бетона.

В результате огневого воздействия на железобетонную конструкцию произошла деструкция поверхностного слоя. При поверхностном прозвучивании на участке поврежденной поверхности получены следующие значения времени (Таблица 2-4).

Таблица 2-4

**Результаты поверхностного прозвучивания**

№ точки прозвучивания	База прозвучивания $L$ , мм	Время прохождения ультразвукового импульса $t$ , мкс
1	100	41,2
2	200	84,5
3	300	119,5
4	400	146,5
5	500	168,5
6	600	198,5
7	700	222,3
8	800	248,6

Необходимо построить годограф и определить толщину поврежденного бетона.

**Решение.** Выполняем построение годографа скорости ультразвука (рисунок 4.4).

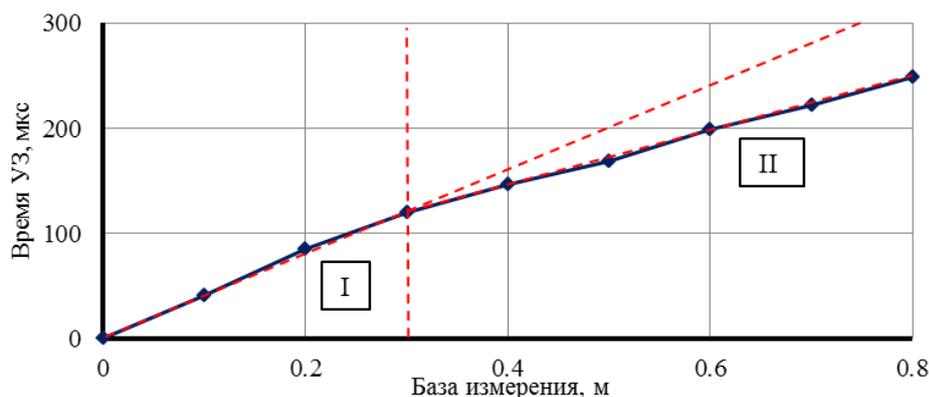


Рисунок 2.6 Годограф времени прохождения ультразвука

Поврежденный в результате повышенной температуры бетон поверхностного слоя имеет меньшие, по сравнению с глубинными, не поврежденными слоями, параметры упругости и прочности, а, следовательно, скорость распространения ультразвука в нем будет ниже, чем в неповрежденном бетоне.

Решение поставленной задачи сводится к определению толщины поврежденного бетона ( $h$ ) по формуле:

$$h = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{v_{II} - v_I}{v_{II} + v_I}}, \quad (2-16)$$

где  $L$  — координата изменения угла наклона годографа, м;  $v_I$  — значение скорости по начальному участку годографа;  $v_{II}$  — значение скорости по последующему участку годографа.

Выполняем построение годографа скорости ультразвука на исследуемой поверхности.

Полученный годограф можно разделить на два участка: I — участок с большим углом наклона относительно оси абсцисс и II — участок с меньшим углом наклона. При этом котангенс угла наклона участков годографа будет определять скорость ультразвука на данном участке —  $v_I$  и  $v_{II}$  соответственно.

$$v_I = \frac{L_I}{t_I} = \frac{0,3}{119,5 \cdot 10^{-6}} = 2510 \text{ м/с}, \quad (2-17)$$

$$v_{II} = \frac{L_{II}}{t_{II}} = \frac{0,8 - 0,3}{(248,6 - 119,5) \cdot 10^{-6}} = 3873 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Определяем глубину поврежденного бетона:

$$h = \frac{0,3}{2} \sqrt{\frac{3873 - 2510}{3873 + 2510}} = 0,069 = 6,9 \text{ см.}$$

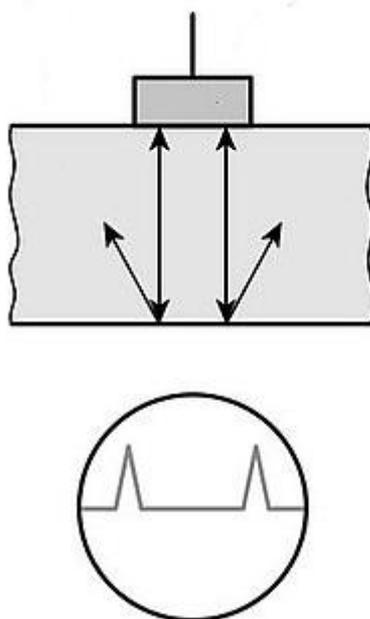
**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:**

1. К какому виду колебаний относится ультразвук (электромагнитные, механические и т.п.)?
2. Как оценивается прочность бетона по измеренной в нем скорости ультразвука?
3. Как устанавливается градуировочная зависимость «скорость ультразвука – прочность бетона»?
4. По какому принципу можно сделать вывод о наличии дефекта в бетонной конструкции по данным ультразвуковых испытаний при сквозном прозвучивании; поверхностном прозвучивании методом продольного профилирования?
5. В чем заключается принцип работы ультразвукового прибора?

### 2.3. *Определение геометрических параметров модели строительной конструкции*

При использовании ультразвука для определения толщины элементов конструкций применяют эхо метод.

Эхо-метод или эхо-импульсный метод — наиболее распространённый: преобразователь генерирует колебания (то есть выступает в роли излучателя) и он же принимает отражённые от дефектов эхо-сигналы (приёмник) (Рисунок 2.7). Также данный метод ультразвукового контроля, позволяет достаточно точно определить координаты дефекта, такие как глубину залегания и положение в исследуемом объекте (относительно преобразователя).



*Рисунок 2.7 схема работы эхо метода*

Для определения толщины конструкций используются ультразвуковые приборы, при определении толщины металлических конструкций используются ультразвуковые толщиномеры (Рисунок 2.8, а) или ультразвуковые дефектоскопы (Рисунок 2.8, б) по металлу так как методы дефектоскопии аналогичны с методами толщинометрии.

Работа изучаемого томографа основана на использовании зависимости параметров прохождения ультразвуковых колебаний (волн) в материалах и конструкциях от их физико-механических свойств..



*Рисунок 2.8 приборы для определения толщина металла а) ультразвуковой толщиномер, б) ультразвуковой дефектоскоп*

Для измерения толщины бетонных, железобетонных и каменных конструкций используются ультразвуковые томографы (Рисунок 2.9), в принципе работ ультразвукового томографа также заложен эхо метод, но сбор данных производится с нескольких датчиков (Рисунок 2.11), а не одно как в толщиномерах по металлу.



Рисунок 2.9 ультразвуковой томограф

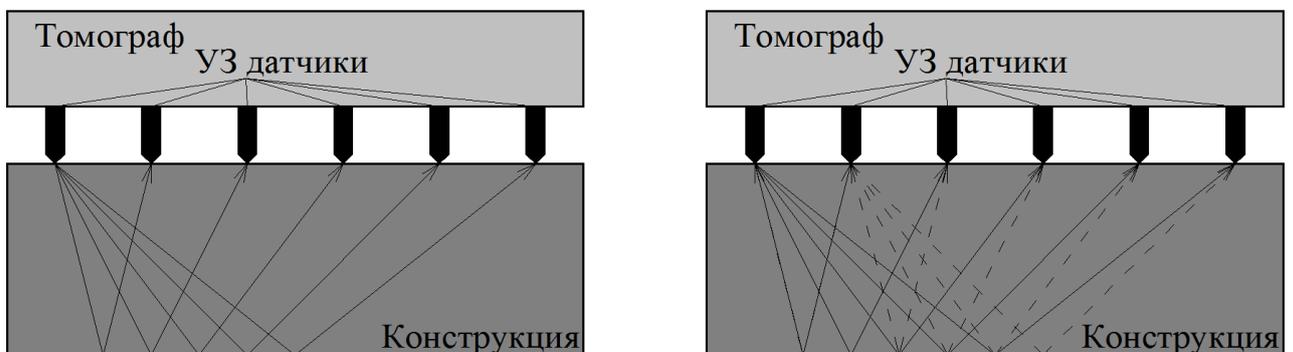
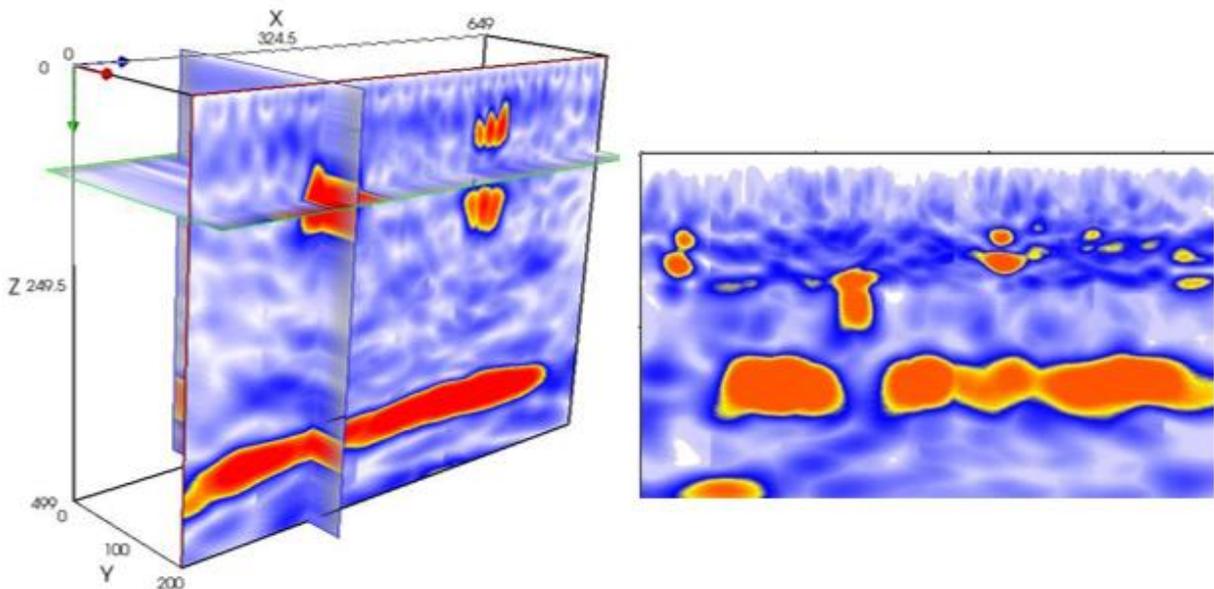


Рисунок 2.10– Принцип работы ультразвукового томографа

Особенностью ультразвукового томографического исследования является визуализация внутренней структуры объекта контроля. Результаты томографического исследования можно представить в виде трехмерного изображения внутреннего строения объекта контроля, или в виде томограмм любого сечения объекта.



*Рисунок 2.11 Пример трехмерного изображения и поперечного среза бетонной конструкции*

### *Интерпретация результатов измерений*

По результатам измерений и последующей обработки изображения на картинках (сечения и 3Д модель) получаем картину с цветовым градиентом от синего до красного, показывающий наличия участков в которых произошло отражение, то есть наличие неоднородностей, при этом изображение не различает материал от которого произошло отражение, что усложняет оценку испытаний.

При интерпретации результатов полученные данных можно разделить на 3 наиболее распространенных характерных форм отражения

1. Отражение перекрывающее всю площадь в плане на определенной глубине, данный характер отражения соответствует донному сигналу, под данную категорию отражения можно также отнести не горизонтальное отражение, которое может быть следствием переменной толщины (наклонная часть конструкции), также данному характеру может соответствовать горизонтальная трещина.

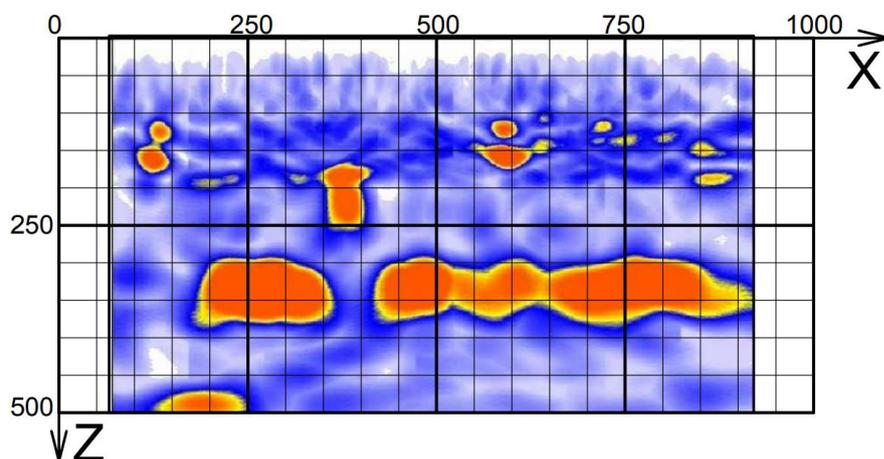
Следует отметить что полное перекрытия отражение не обязательно распространены случае когда при наличии других неоднородностей, они перекрывают доступ ко дну конструкцию изза чего возможно локальные пробелы обычно проявляющиеся под неоднородностями или локальное смещение/ искажение толщины.

2. Отражение в разрезе имеющее круглую или овальную геометрию, а в плане протяженный характер, данный вид отражения соответствует наличию арматурных стержней, сверлений, труб и т.д., не всегда является дефектом.

3. Отражение имеющее локальное характер во всех сечениях, то есть отсутствие протяженного характера может сигнализировать а наличием непролива или неоднородного материала в теле бетона.

### **Задача 2.7 Определение толщины конструкции и неоднородностей**

По результатам проведения исследования ОК с использованием ультразвукового томографа, оценить наличие дефектов и толщину конструкции.



*Рисунок 2.12 Поперечный скан конструкции*

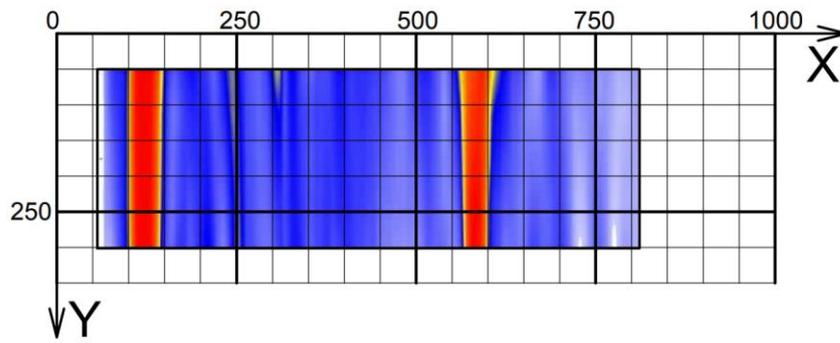


Рисунок 2.13 Горизонтальный скан на глубине 150мм

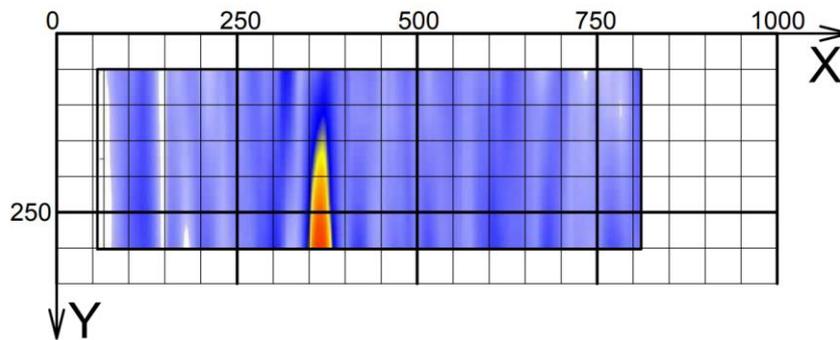


Рисунок 2.14 Горизонтальный скан на глубине 220мм

## Решение

### Анализ отражений

- 1- Первое отражения на глубине 150 мм, имеет на (Рисунок 2.12) овальный характер а на скане (Рисунок 2.13) протяжённый характер на всю ширину исследуемого образца.
- 2- Второе отражения на глубине 220 мм, имеет на (Рисунок 2.12) овальный характер а на скане (Рисунок 2.14) протяжённый характер который обрывается на середине ширины, что говорит о о неоднородности меньшей по длине неоднородности 1.
- 3- Третье отражения на глубине 150 мм, имеет на (Рисунок 2.12) овальный характер а на скане (Рисунок 2.13) протяжённый характер на всю ширину исследуемого образца.
- 4- Четвертое отражение на глубине приблизительно 300мм имеет отражение по все длине объекта (Рисунок 2.12) за исключением двух

участков под неоднородностями, что говорит о том, данное отражение является донным сигналом а глубина отражение соответствует толщине. Вывод: по результатам сканирования было обнаружено 2 протяженных объекта (арматура, труба или отверстие), один объект не сквозного характера, и также толщину объекта 300мм.

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

#### *3.1. Определение конструктивной поправки и прогиба балки при приемо-сдаточных испытаниях Теоретические сведения*

Натурное обследование конструкций при необходимости может включать в себя этап более углубленного экспериментального исследования несущих конструкций (**натурные испытания**).

**Натурное испытание** – это совокупность операций связанных с выявлением и проверкой состояния и работоспособности объекта в целом, и каждого из его элементов при специальном (испытательном) или эксплуатационном нагружении.

Цель натурных испытаний – оценка показателей, характеризующих свойства и состояние эксплуатируемых конструкций, а также изучение процессов, протекающих в них, для проверки правильности и точности теоретических расчетов.

Натурные испытания конструкций позволяют получить дополнительную информацию о действительных граничных условиях, об особенностях деформирования конструкции, о напряжениях в ее сечениях. При испытаниях нагрузкой малой величины конструкция не доводится до разрушения, при этом может быть получена информация о напряженно-деформированном состоянии материала конструкции, которая позволяет сделать заключение о выборе расчетной схемы для оценки напряженно-деформированного

состояния при более высоком уровне нагрузки. Проведение натуральных испытаний позволяет получить более точную информацию для оценки несущей способности конструкций. Однако следует учитывать, что натурные испытания – мероприятие дорогостоящее, требуют значительного времени и технологических перерывов в работе оборудования, которые в эксплуатируемых конструкциях связаны с экономическими издержками.

Поэтому, если есть возможность дать заключение о состоянии сооружения на базе информации, полученной на первом этапе обследования (освидетельствование), то натурные испытания не проводят.

При статических испытаниях строительных конструкций измеряются действующие нагрузки, перемещения (линейные и угловые), а также деформации в наиболее напряженных зонах и сечениях конструкции.

После проведения испытаний производится сравнение перемещений, продольных усилий, напряжений, моментов, полученных экспериментально, с их расчетными значениями. Вычисляется конструктивная поправка ( $k_f, k_M, k_\sigma$ ), равная отношению экспериментального значения перемещения, напряжения, момента или внутреннего усилия к расчетному. Если  $k=1$  – расчетная схема полностью соответствует действительной работе конструкции. Если  $k < 1$  – конструкция имеет запас прочности. Если  $k > 1$  – необходимо усиление конструкций, либо снижение нагрузок.

### **Задача 3.3.1. Определение несущей способности**

Выполнить проверку прочности консольной балки двутаврового сечения №18, если известно, что при испытаниях этой балки сосредоточенной силой  $F = 4\text{кН}$  в нижнем волокне около защемления измеренная деформация составила  $\varepsilon = 21,5 \cdot 10^{-5}$ . Предполагаемая нагрузка  $F_{max} = 20\text{кН}$ . Геометрические характеристики двутавра №18  $I_x = 1290 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ ,  $W_x = 143 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ . Коэффициент условий работ  $\gamma_c = 1,0$ , расчетное сопротивление

стали  $R_y = 250$  МПа. Расчетная схема представлена на **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

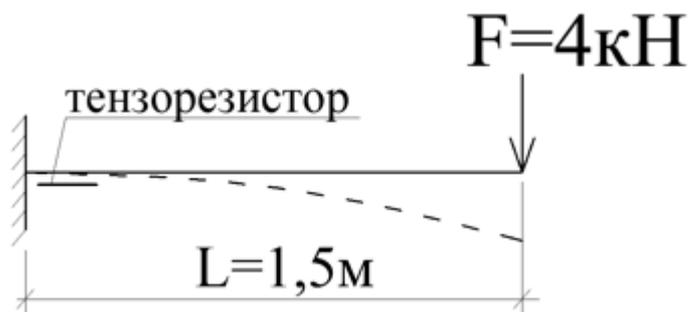


Рисунок 3.1 Расчетная схема натурального испытания

### Решение

Условие прочности упругой балки, работающей на изгиб, представлено в формуле:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x} \leq R_y \cdot \gamma_c \quad (3.1)$$

В результате натуральных испытаний следует определить коэффициент конструктивной поправки для консольной балки. Для этого находим теоретическое и экспериментальное значение максимальных напряжений при испытательной нагрузке  $F=4$ кН.

Теоретическое значение определяем по формуле:

$$\sigma_{теор} = \frac{F \cdot L}{W_x} = \frac{4000 \cdot 1,5}{143 \cdot 10^{-6}} = 41,96 \text{ МПа}$$

Экспериментальное значение напряжения определяют по формуле:

$$\sigma_{эксп} = \varepsilon \cdot E = 21,5 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 = 45,15 \text{ МПа}$$

Конструктивную поправку для вычисления напряжений определяют по формуле:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{эксп}}{\sigma_{теор}} = \frac{45,15}{41,96} = 1,076$$

Определяем величину максимальных нормальных напряжений при предполагаемой нагрузке  $F_{max} = 20\text{кН}$ :

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max} \cdot L}{W_x} \cdot k_\sigma = \frac{20000 \cdot 1,5}{143 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,076 = 225,73 \text{ МПа}$$

Проверяем условие прочности консольной балки:

$$\sigma_{max} = 225,73 \text{ МПа} < 250 \text{ МПа} = R_y \cdot \gamma_c$$

Условие выполняется, следовательно – консольная балка удовлетворяет условиям прочности.

### Задача 3.3.2. Определение прогиба балки

Определить величину нагрузки и вызванный этой нагрузкой максимальный прогиб стальной балки, если измерена относительная деформация ( $\varepsilon = 80 \cdot 10^{-5}$ ) в крайнем нижнем волокне балки в сечении, где приложена сосредоточенная сила  $F$ , модуль упругости стали  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ . Расчетная схема представлена на Рисунок 3.2, где  $L = 2,0 \text{ м}$ ;  $h = 0,08 \text{ м}$ ;  $b = 0,02 \text{ м}$ .

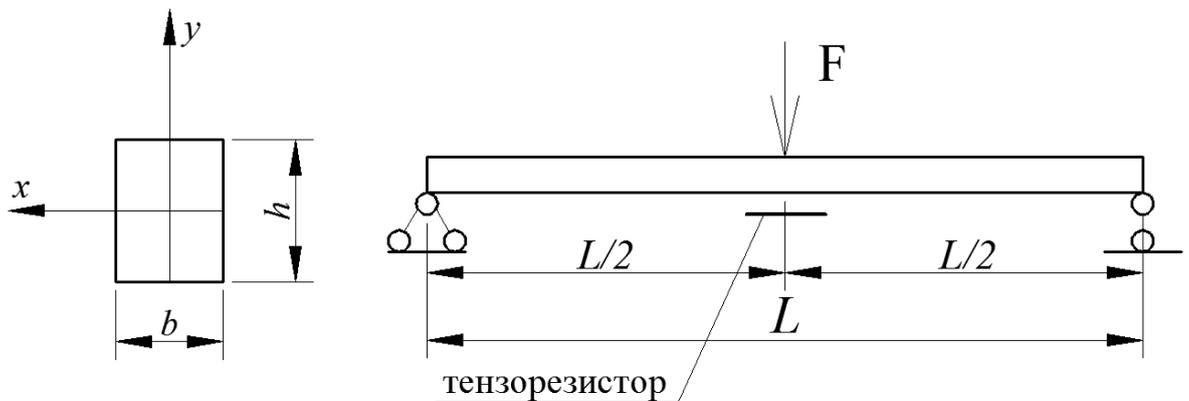


Рисунок 3.2 Расчетная схема балки

### Решение

Для однопролетной балки с шарнирным опиранием, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета, максимальные напряжения определяются из выражения:

$$\sigma_{max} = \frac{F \cdot L}{4 \cdot W_x} \quad (3.2)$$

Отсюда нагрузка  $F$  может быть вычислена по формуле:

$$F = \frac{4 \cdot \sigma_{max} \cdot W_x}{L} \quad (3.3)$$

В конкретном случае величина максимальных нормальных напряжений  $\sigma_{max}$  определяется по закону Гука для одноосного напряженного состояния по формуле:

$$\sigma_{max} = \varepsilon \cdot E \quad (3.4)$$

Для прямоугольного сечения момент сопротивления определяют по формуле:

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (3.5)$$

В результате величина приложенной силы будет равна:

$$F = \frac{4 \cdot \varepsilon \cdot E \cdot W_x \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot L} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,02 \cdot 0,08^2 \cdot 80 \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^{11}}{2} = 7,168 \text{ кН}$$

Значение максимального прогиба для балки с шарнирным опиранием, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета определяют по формуле:

$$f_{max} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \quad (3.6)$$

Значение величины момента инерции для прямоугольного сечения определяют по формуле:

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.7)$$

Отсюда величина прогиба будет равна:

$$f_{max} = \frac{F \cdot L^3 \cdot 12}{48 \cdot E \cdot b \cdot h^3} = \frac{F \cdot L^3}{4 \cdot E \cdot b \cdot h^3} = \frac{7168 \cdot 2^3}{4 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,02 \cdot 0,08^3} = 0,06 \text{ см}$$

### *Задача 3.3.3. расчет балки с распределенной нагрузкой*

При вводе здания в эксплуатацию были проведены статические испытания стальной шарнирно-опертой балки перекрытия равномерно распределенной нагрузкой. Пролет балки равен  $L = 6,0$ м. Интенсивность распределительной нагрузки  $q = 2$ кН/м. Замеренный прогиб в середине пролета балки равен  $y = 9,2$ мм. Определить конструктивную поправку  $k_y$  и прогиб балки от

распределенной нагрузки  $q = 10 \text{ кН/м}$ , если  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ Мпа}$ ,  $I_x = 1840 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$ . Расчетная схема представлена на Рисунок 3.3

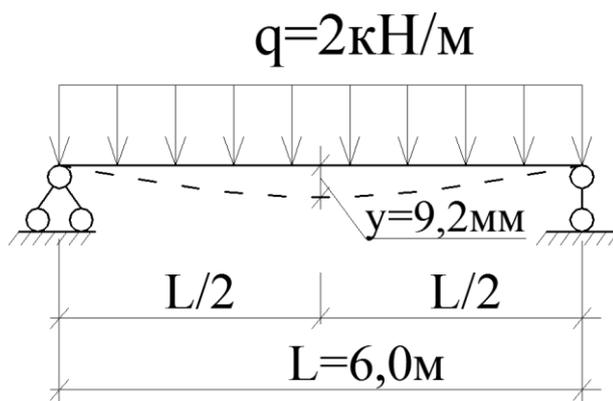


Рисунок 3.3 Расчетная схема балки

### Решение

Аналитические выражения для определения прогиба в середине пролета шарнирно опертой балки с равномерно распределенной нагрузкой, выражается формулой:

$$y^{\text{теор}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I_x} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2000 \cdot 6,0^3}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 1840 \cdot 10^{-8}} = 8,73 \text{ мм}$$

Определяем коэффициент конструктивной поправки:

$$k_y = \frac{y^{\text{эксп}}}{y^{\text{теор}}} = \frac{9,2}{8,73} = 1,05$$

Фактический прогиб балки в середине пролета при нагрузке  $q = 10 \text{ кН/м}$  будет равным:

$$y = \frac{q(10)}{q(2)} \cdot k_y \cdot y^{\text{теор}} = \frac{10}{2} \cdot 1,05 \cdot 8,73 = 45,8 \text{ мм}$$

#### Задача 3.3.4. Определение фактического прогиба балки

Требуется определить фактический прогиб подкрановой балки от точечной нагрузки в середине пролета 5 кН и коэффициент конструктивной поправки. Расчетная схема – шарнирно опертая однопролетная балка, с размером пролета 3 метра. Сечение балки – двутавр №10 из стали с модулем упругости

$E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа. В результате натурных испытаний получены следующие значения прогибов в пролете (п-2) и на опорах (п-1, п-3).

Таблица 3-1

**Данные по прогибомерам**

№ прогибомера	Отсчёты по прогибомерам, мм		
	$F = 0$	$F = 5000H$	разность отсчётов, $\Delta$ , мм
п-1	0	0,1	0,1
п-2	0	6,9	6,5
п-3	0	0,2	0,2

**Решение**

Определяем экспериментальное значение прогиба в середине пролета. Для более достоверных результатов следует измерять не только прогиб балки, но и величину осадки опор от действия прикладываемой нагрузки:

$$f^{\text{экс}} = V_{\text{п-2}} - \frac{V_{\text{п-1}} + V_{\text{п-3}}}{2} \quad (3.8)$$

$$f^{\text{экс}} = 6,9 - \frac{0,1 + 0,2}{2} = 6,75 \text{ мм}$$

Теоретическое значение прогиба определяют по уравнению теории упругости:

$$f^{\text{теор}} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \quad (3.9)$$

$$f^{\text{теор}} = \frac{5000 \cdot 3^3}{48 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 1,98 \cdot 10^{-8}} = 6,76 \text{ мм}$$

Вычисляем коэффициент конструктивной поправки по формуле:

$$k_f = \frac{f^{\text{экс}}}{f^{\text{теор}}} \quad (3.10)$$

$$k_f = \frac{6,75}{6,76} = 0,998$$

Коэффициент конструктивной поправки приближенно равен единице, следовательно действительная схема опирания подкрановой балки соответствует расчетной.

#### **4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОМБИНИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

##### *4.1. Определение фактических жесткостных характеристик строительных конструкций по результатам выполненных экспериментальных исследований*

Теоретические сведения

Испытание конструкций зданий и сооружений является основным элементом обследования, но по своей методологии, по аппаратному обеспечению и по методам обработки представляет самостоятельное направление экспериментальной механики. Цель его – в создании методов и средств, позволяющих на базе экспериментальных исследований получить объективную оценку поведения конструкций инженерных зданий и сооружений, элементов и материалов из которых они изготовлены.

Испытания конструкций и сооружений в натуре производятся как вновь построенных так и эксплуатируемых. Испытания вновь построенных сооружений производятся в относительно редких случаях, преимущественно перед вводом в эксплуатацию особо ответственных конструкций (пролетные конструкции мостов, пространственные покрытия и тому подобное.)

Вновь построенные сооружения испытываются с целью проверки соответствия их проектным и нормативным требованиям в отношении несущей способности, жесткости и трещиностойкости и возможности принятия в эксплуатацию. Испытания эксплуатируемых конструкций и сооружений производят с целью выяснения их общего состояния, а также фактической несущей способности, обычно в случае необходимости увеличения нагрузки, действующей на несущие конструкции этих

сооружений, или при появлении сомнений в надежности несущих конструкций вследствие износа или повреждений.

Особое место занимают испытания опытных конструкций перед внедрением их в массовое производство. Необходимость испытания опытных конструкций возникает в связи с тем, что в них обычно применяются новые формы и очертания, используются более совершенные методы расчета, смелее назначаются соотношения и размеры конструктивных элементов, применяются новые материалы и их сочетания и так далее конструкции испытываются, как правило, до разрушения, что позволяет выявить наиболее слабые места в них и внести в проект коррективы, устраняющие эти недостатки.

Нормативными документами требуется также производить испытания периодически отбираемых образцов конструкций, которые выпускаются на заводах железобетонных конструкций в больших количествах. Эти испытания необходимы главным образом для проверки качества применяемых материалов и выполнения технологических правил изготовления конструкций. Испытания таких конструкций чаще всего производятся нагрузкой, превышающей расчетную настолько, чтобы полученные запасы прочности были достаточны. Результаты испытаний отдельных конструкций характеризуют качество всей партии продукции, от которой отобраны испытанные образцы. Заводские испытания производят как правило на заводах железобетонных конструкций, имеющих специальные испытательные стенды и хорошо оборудованные лаборатории.

Лабораторные испытания проводят для выявления свойств материала конструкций, а также в лабораториях как правило производят испытания небольших образцов и мелкомасштабных моделей, преимущественно с научно - исследовательскими целями. В последнее время все большее применение находят подвижные лаборатории для исследований и испытаний строительных конструкций и сооружений, смонтированные в

железнодорожных вагонах, на автомобилях, катерах и оснащенные современной измерительной аппаратурой.

В тех случаях, когда исследования работы конструкций трудно осуществить, пользуясь натурными образцами (нужны большие испытательные полигоны, значительные испытательные нагрузки; стоимость экспериментальных работ оказывается высокой); или когда натурные сооружения испытать практически невозможно, испытаниям подвергаются модели исследуемых конструкций или сооружений.

#### Задача 4.1.1. Определение геометрических параметров консоли

Для определения фактического момента инерции ( $I_x$ ) провели статические испытания стальной консольной балки балкона при нагрузке  $F = 15$  кН. Вылет консоли  $L = 2,5$  м. Замеренный максимальный прогиб  $f = 3,0$  см. Найти момент инерции сечения балки если модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  Мпа. Расчетная схема представлена на Рисунок 4.1.

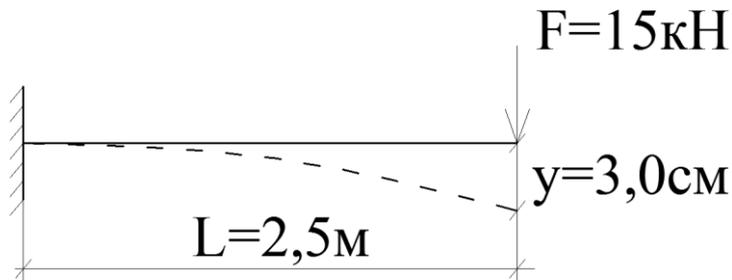


Рисунок 4.1 Расчетная схема консоли

#### Решение

Момент инерции сечения консольной балки нагруженной сосредоточенной силой может быть определен из выражения:

$$I_x = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot f} = \frac{15000 \cdot 2,5^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,03} = 54,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4 \quad (4-1)$$

#### Задача 4.1.2. Расчет балки с распределенной нагрузкой

При вводе здания в эксплуатацию были проведены статические испытания стальной шарнирно-опертой балки перекрытия равномерно распределенной нагрузкой. Пролет балки равен  $L = 6,0\text{м}$ . Интенсивность распределительной нагрузки  $q = 2\text{кН/м}$ . Замеренный прогиб в середине пролета балки равен  $y = 9,2\text{мм}$ . Определить конструктивную поправку  $k_y$  и прогиб балки от распределенной нагрузки  $q = 10\text{кН/м}$ , если  $E = 2,1 \cdot 10^5\text{Мпа}$ ,  $I_x = 1840 \cdot 10^{-8}\text{ м}^4$ . Расчетная схема представлена на Рисунок 4.2

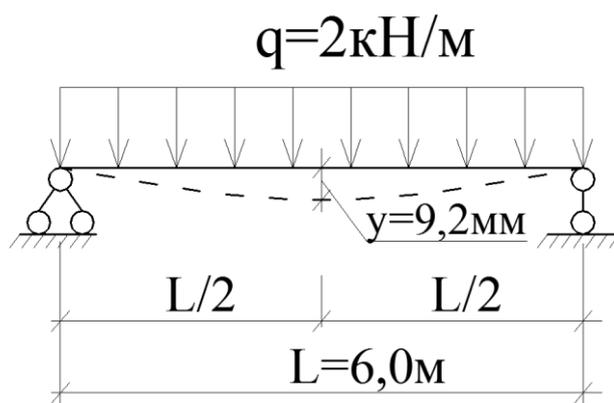


Рисунок 4.2 Расчетная схема балки

### Решение

Аналитические выражения для определения прогиба в середине пролета шарнирно опертой балки с равномерно распределенной нагрузкой, выражается формулой:

$$y^{\text{теор}} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I_x} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2000 \cdot 6,0^3}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 1840 \cdot 10^{-8}} = 8,73 \text{ мм} \quad (4-2)$$

Определяем коэффициент конструктивной поправки:

$$k_y = \frac{y^{\text{эксп}}}{y^{\text{теор}}} = \frac{9,2}{8,73} = 1,05 \quad (4-3)$$

Фактический прогиб балки в середине пролета при нагрузке  $q = 10\text{кН/м}$  будет равным:

$$y = \frac{q(10)}{q(2)} \cdot k_y \cdot y^{\text{теор}} = \frac{10}{2} \cdot 1,05 \cdot 8,73 = 45,8 \text{ мм} \quad (4-4)$$

### Задача 4.1.3. Определение жесткости балки и модуля упругости материала

Определить изгибную жесткость ( $EI_x$ ) и модуль упругости материала балки, если измеренный в середине пролета прогиб при интенсивности распределенной нагрузки  $q = 8,5 \text{ кН/м}$  составил  $y = 0,01 \text{ м}$ . Сечение и схема балки представлены на рис. 4.3.

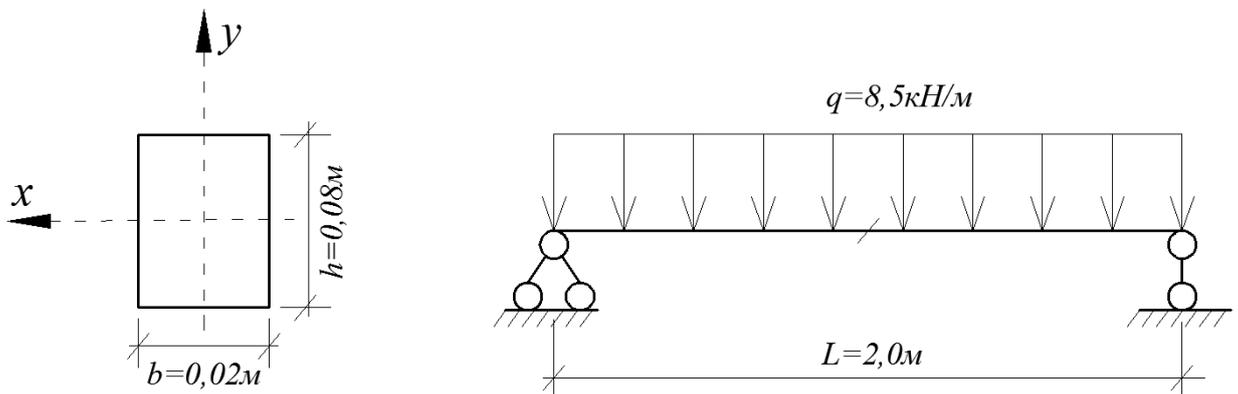


Рисунок 4.4 Расчетная схема балки

### Решение

Изгибная жесткость для шарнирно-опертой балки, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, может быть определена по формуле:

$$E \cdot I_x = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{8500 \cdot 2,0^3}{0,01} = 177,08 \text{ кН} \cdot \text{м}^2 \quad (4-5)$$

Определяем модуль упругости материала балки по формуле:

$$E = \frac{E \cdot I_x \cdot 12}{b \cdot h^2} = \frac{177083 \cdot 12}{0,02 \cdot 0,08^2} = 2,075 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2 \quad (4-6)$$
$$= 2,075 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

### 4.2. Экспериментальные исследования строительных конструкций при динамических воздействиях

#### Теоретические сведения

Под динамическими нагрузками понимают воздействия меняющиеся настолько быстро, что в элементах конструкций возникают силы инерции, существенно влияющие на их работу.

Величина, направления и место приложения нагрузок могут изменяться независимо друг от друга или одновременно.

Основные виды динамических воздействий:

- а) силы инерции движущихся частей механизмов и машин;
- б) подвижная нагрузка;
- в) пульсации ветра;
- г) сейсмические воздействия.

Под действием динамической нагрузки в элементах конструкций возникают перемещения, деформации, напряжения и усилия (носящие характер колебаний). Основной динамической характеристикой конструкции являются собственные ей частоты свободных колебаний. По мере приближения частоты вынужденных колебаний конструкции к частоте ее собственных колебаний возрастают амплитуда вынужденных колебаний (следовательно и внутренние усилия и напряжения), обусловленные этими воздействиями. Максимальный амплитудный –резонанс. Совокупность частот собственных колебаний конструкций называется спектром ее частот собственных колебаний, образующих спектр, определяется степенью свободы колеблющейся системы. Строительные конструкции вообще говоря – системы с бесконечным числом степеней свободы. Если колебания более высоких частот в десятки раз превышают частоту самого низкого тона, то систему называют с «одной степенью свободы» (условно)-(гибкие балки с сосредоточенным грузом, когда по сравнению с ним собственным весом можно пренебречь, массивные фундаменты). С точки зрения оценки работы конструкций необходимо знать основную частоту и несколько следующих за ней. Каждой частоте спектра соответствует своя форма колебаний данной конструкции.

#### **Задача 4.2.1. Определение модуля упругости**

Определить приведенный модуль упругости железобетонной однопролетной балки с шарнирным опиранием. Длина балки  $L = 6,0$  м.

Размеры прямоугольного сечения  $h = 0,45$  м,  $b = 0,2$  м. Вес одного кубометра бетона балки  $P = 2200 \text{ кг/м}^3$ . При динамическом испытании балки определена частота первой формы колебаний  $f_0 = 50$  Гц. Считать, что  $(EI)_{\text{стат}} = (EI)_{\text{дин}}$ .

### Решение

Приведенный модуль упругости для балки с шарнирным опиранием может быть определен из формулы:

$$f_0^T = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E_{\text{пр}} \cdot I_x}{m}} \quad (4-7)$$

где  $I_x$  – Момент инерции балки, определяемый по формуле:

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,2 \cdot 0,45^3}{12} = 0,0015 \text{ м}^4 \quad (4-8)$$

Погонная масса балки определяется по формуле:

$$m = P \cdot A \quad (4-9)$$

где  $A$  – Площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

Отсюда:

$$m = P \cdot b \cdot h = 2200 \cdot 0,45 \cdot 0,2 = 198 \text{ кг/м} \quad (4-10)$$

Переведем погонную массу в погонный вес, умножив и разделив на погонную массу на ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  и выделим Ньютоны. Отсюда  $m = 198 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^2$ .

Приведенный модуль упругости железобетонной балки будет равен:

$$\begin{aligned} E_{\text{пр}} &= \frac{f_0^2 \cdot 2^2 \cdot L^4 \cdot m}{\pi^2 \cdot I_x} = \frac{50^2 \cdot 2^2 \cdot 6,0^4 \cdot 198}{3,14^2 \cdot 0,0015} \\ &= 1,73 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2 = 1,73 \cdot 10^5 \text{ МПа} \end{aligned} \quad (4-11)$$

### Задача 4.2.2. Определение момента трещинообразования

Определить предельный изгибающий момент, соответствующий стадии трещинообразования ( $M_{\text{тр}}$ ) шарнирно опертой прямоугольной балки.

Предельная деформация растяжения бетона  $\varepsilon = 20 \cdot 10^{-5}$ , пролет балки  $L = 6$  м, высота сечения  $h = 0,4$  м, погонный вес  $q = 190$  кг/м. Собственная частота первой формы колебаний балки  $f_0 = 35$  Гц. Считать, что  $(EI)_{\text{стат}} = (EI)_{\text{дин}}$ .

### Решение

Изгибающий момент трещинообразования в ж/б шарнирно опертой балке может быть определен по формуле:

$$M_{\text{тр}} = \frac{8 \cdot \varepsilon \cdot L^4 \cdot f_0^2 \cdot q}{\pi^2 \cdot h} = \frac{8 \cdot 20 \cdot 10^{-5} \cdot 6,0^4 \cdot 35^2 \cdot 190}{3,14^2 \cdot 0,4 \cdot 9,8} \quad (4-12)$$

$$= 124 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

### Задача 4.2.3. Установление расчетной схемы

Установить фактическую расчетную схему балки, если известно, что при испытании ее сосредоточенной статической нагрузкой  $F = 150$  кН, приложенной в середине пролета максимальный прогиб составил  $y = 0,021$  м, а при динамических испытаниях собственная частота колебаний балки  $f_0 = 20$  Гц. Пролет балки  $L = 6$  м, погонный вес  $q = 150$  кг/м. Считать, что  $(EI)_{\text{стат}} = (EI)_{\text{дин}}$ .

### Решение

Предполагая шарнирное опирание балки определим значение динамической жесткости балки по формуле:

$$(EI)_{\text{дин}} = \frac{f_0^2 \cdot 4 \cdot L \cdot m}{\pi^2} = \frac{20^2 \cdot 4 \cdot 6,0 \cdot 150}{3,14^2 \cdot 9,8} \quad (4-13)$$

$$= 3,22 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 3,22 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{м}^2$$

Найдем также значение статической жесткости балки по формуле:

$$(EI)_{\text{стат}} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot y} = \frac{150 \cdot 6^3}{48 \cdot 0,021} = 3,21 \cdot 10^4 \text{ кН} \cdot \text{м}^2 \quad (4-14)$$

Так как полученные значения жесткости  $(EI)_{\text{стат}}$  и  $(EI)_{\text{дин}}$  для принятого шарнирного опирания балки практически одинаковы, то следовательно фактическое опирание балки является шарнирным.

#### Задача 4.2.5. Определение усилия натяжения в арматуре

Определить усилие натяжения и напряжения стальной арматуры длиной  $L = 3$  м, диаметром  $d = 4$  мм, если частоты собственных колебаний арматурных стержней соответственно равны:  $f_0(1) = 25$  Гц;  $f_0(2) = 30$  Гц.

Решение. Усилие натяжения арматуры можно определить из выражения:

$$F = 4 \cdot L^2 \cdot f_0^2 \cdot m \quad (4-15)$$

где  $m$  – погонная масса стержня, определяемая по формуле:

$$m = \rho \cdot A \quad (4-16)$$

где  $\rho$  – плотность материала арматуры ( $7,8 \cdot 10^3 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^4$ );

$A$  – площадь сечения арматурного стержня,  $\text{м}^2$ .

Напряжение в арматуре определяем по формуле:

$$\sigma = 4 \cdot L^2 \cdot f_0^2 \cdot \rho \quad (4-17)$$

Определяем напряжения в натянутых арматурных стержнях:

$$\sigma(1) = 4 \cdot 3^2 \cdot 25^2 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 175,5 \text{ МПа}$$

$$\sigma(2) = 4 \cdot 3^2 \cdot 30^2 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 251,7 \text{ МПа}$$

Усилия натяжения в арматурных стержнях соответственно равны:

$$F(1) = \sigma(1) \cdot A = 175,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 4^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 27 \text{ кН}$$

$$F(2) = \sigma(2) \cdot A = 251,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 4^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 79,3 \text{ кН}$$