

МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра строительных конструкций, оснований и фундаментов  
имени профессора Борисова Ю.М.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НОРМАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК**

### *МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ*

*к выполнению лабораторных работ для студентов специальностей  
08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и  
08.03.01 «Строительство»  
всех форм обучения*

Воронеж 2022

УДК 624.012.45.001.24(07)  
ББК 38.53я7

**Составители:**

*А. Э. Поликутин, П. А. Зябухин*

**Исследование свойств нормальных и наклонных сечений железобетонных балок:** методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальностей 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А.Э. Поликутин, П.А. Зябухин. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – 20 с.

В методических указаниях содержится методика проведения, выполнения и оформления результатов лабораторных работ по исследованию прочности нормальных и наклонных сечений изгибаемых элементов.

Предназначены для студентов специальностей 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и 08.03.01 «Строительство» всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ ИСНиНСЖБ.pdf.

Ил. 5. Табл. 7. Библиогр.: 6 назв.

**УДК 624.012.45.001.24(07)**  
**ББК 38.53я7**

*Рецензент – Ю.В. Иванов, канд. техн. наук, доц. кафедры  
металлических и деревянных конструкций ВГТУ*

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ВВЕДЕНИЕ

Испытание строительных конструкций и сооружений имеют большое значение для развития строительной науки и техники. Результаты испытаний дают возможность проверить надежность принятых методов расчета и конструирования, а также правильность технологии изготовления элементов конструкций и сооружений. Испытания имеют особое значение для железобетонных конструкций, теория сопротивления которых строится на опытных данных и исходит из действительного напряженно-деформированного состояния конструкций под нагрузкой.

Настоящие методические указания призваны ознакомить студентов с основами испытаний железобетонных конструкций, оценкой прочности и жесткости, методами расчетов железобетонных изгибаемых элементов.

Методическими указаниями предусмотрено выполнение лабораторных испытаний железобетонных конструкций с целью определения несущей способности и изучения напряженно-деформированного состояния. Предлагается выполнить три лабораторные работы. В первой работе исследуется прочность нормального сечения железобетонной балки с разрушением по растянутой зоне, во второй - прочность нормального сечения с разрушением по сжатой зоне, в третьей – прочность наклонных сечений железобетонной балки.

Во всех работах балки испытывают до разрушения. При испытаниях измеряют деформации бетона и арматуры, прогибы, ширину раскрытия трещин, фиксируют картину трещинообразования и вид разрушения железобетонных элементов, заполняют таблицы, строят графики, оценивают прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных конструкций, оформляют отчеты, отвечают на контрольные вопросы.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО РАСТЯНУТОЙ ЗОНЕ

1.1. **Цель работы** – исследовать прочность нормального сечения балки с разрушением по растянутой зоне, которое наступает с достижением арматурой предела текучести.

1.2. **Задание:**

- выполнить расчет несущей способности балки;
- определить фактическую несущую способность балки методом статического нагружения;
- выполнить измерения деформаций бетона и арматуры, прогибов балки;
- исследовать характер образования трещин и разрушения балки;
- выполнить оценку прочности балки;
- оформить отчет;

- ответить на контрольные вопросы.

### 1.3. Краткие теоретические сведения

Железобетон состоит из двух различных по физико-механическим свойствам материалов: стальной арматуры – упругого материала и бетона – упруго-пластического материала, не подчиняющегося закону Гука. Несущая способность железобетонных конструкций, вычисленная по формулам сопротивления упругих материалов, часто существенно отличается от прочности, установленной при испытаниях. Образование трещин в растянутой зоне еще больше затрудняет возможность применения методов расчета сопротивления упругих материалов к расчету железобетонных конструкций. В связи с этим, современная прикладная теория расчета железобетона строится на основе опытных данных, законах механики твердого тела и исходит из действительного напряженного состояния под нагрузкой. Опыты показывают, что характер разрушения зависит главным образом от количества и вида арматуры. В нормально армированных балках, когда количество арматуры не превышает определенного предела, разрушение начинается в растянутой арматуре и заканчивается раздроблением бетона сжатой зоны. В арматуре из мягких сталей напряжения достигают предела текучести, что приводит к интенсивному увеличению ширины трещин, а элемент получает значительный прогиб, высота сжатой зоны сокращается, и напряжения быстро достигают предела прочности при сжатии. Разрушение носит пластический характер.

### 1.4. Выполнение работы

1.4.1. Расчет несущей способности балки выполняется с учетом расчетных и фактических сопротивлений материалов, геометрических размеров и армирования элемента, принятой схемы нагружения. Геометрические размеры и армирование устанавливаются на предназначенном для испытания образце с помощью стальной рулетки с точностью до 1 мм и указывают на рис. 1.1, где приводят так же диаметр арматуры и рабочую высоту сечения балки. Численные значения геометрических характеристик сечения, необходимые для расчета несущей способности балки, указывают в табл. 1.1.

Характеристики прочности материалов определяют путем стандартных испытаний бетона и арматуры в соответствии с требованиями /1/, /2/, /4/. Прочность бетона балки может быть также определена неразрушающими методами, в т.ч. с использованием молотка Кашкарова по /3/. Расчетная прочность арматурной стали, если класс определен, принимается в соответствии с /6/. Значения характеристик прочности материалов приводят в табл. 1.1.

Схема нагружения балки должна соответствовать реальной схеме работы элемента под нагрузкой. В статическом отношении испытываемая конструкция представляет собой простую балку, нагруженную двумя сосредоточенными грузами. Расстояние между осями опор и грузов получают путем измерений на испытательном стенде и указывают на рис. 1.2, где приводится также схема расположения приборов для регистрации деформаций и перемещений.

Расчет проектной прочности балки выполняют для середины пролета по формулам (1.1-1.5) при расчетных характеристиках прочности материалов (см. табл. 1.1).

Определение высоты сжатой зоны бетона выполняют по формуле

$$x_{пр} = \frac{R_s * A_s}{R_b * b} \quad (1.1)$$

Значение проектного разрушающего момента определяют по формуле

$$M_{пр} = R_s * b * x_{пр} * (h_0 - 0,5 * x_{пр}) \quad (1.2)$$

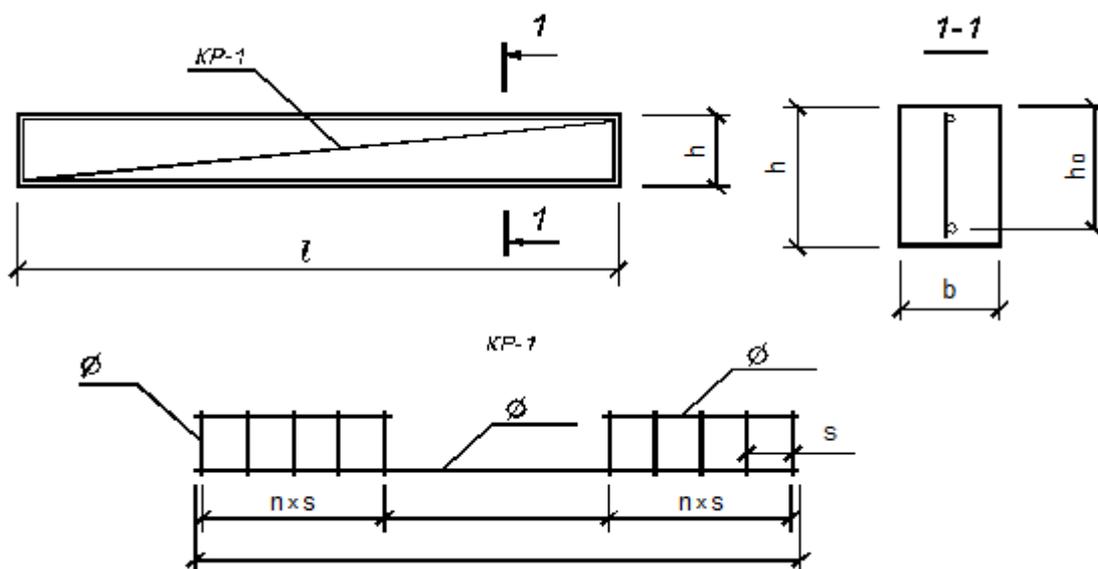


Рис.1.1. Опалубочный чертеж и схема армирования балки

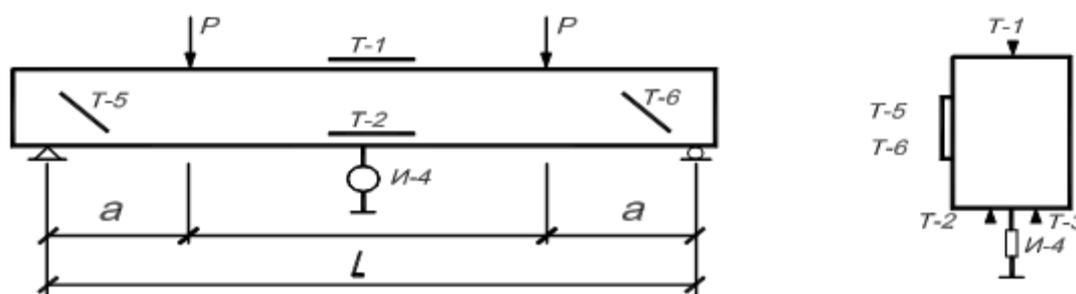


Рис. 1.2. Схема испытания, расположение приборов: Т1,Т2,Т3,И4 – для выполнения лабораторных работ №1,2,3; приборы Т5,Т6 – для выполнения лабораторной работы №3

Величину проектной разрушающей нагрузки на балку с учетом собственного веса балки определяют по формуле (1.3) при схеме испытания по рис. 1.2

$$2P_{пр} = \frac{2}{a} \left( M_{пр} - \frac{q \cdot l^2}{8} \right) \quad (1.3)$$

где  $l$  - пролет балки,

$q$  – распределенная погонная нагрузка на балку от собственного веса (формула 1.4)

$$q = b \cdot h \cdot \gamma \quad (1.4)$$

где  $b$  и  $h$  – соответственно ширина и высота балки,

$\gamma$  - вес железобетона, равный  $25 \text{ КН/м}^3$ .

Таблица 1.1

Исходные данные для расчетов прочности балки

Величина		Обозначение	Числовое значение
1. Характеристики прочности			
1.	Кубиковая прочность бетона при сжатии, МПа	$\bar{R}$	$\bar{R} * (1 - x * v_m)$ $\bar{R} * (0,77 - 0,001 * \bar{R})$ $R_{sn}$
2.	Гарантируемая кубиковая прочность бетона при сжатии с обеспеченностью 0.95 (класс бетона при сжатии), МПа	$B$	
3.	Призменная прочность бетона при сжатии (нормативное сопротивление), МПа	$R_{пр}^{\phi}$	
4.	Расчетное сопротивление бетона при сжатии, МПа	$R_b$	
5.	Предел текучести арматуры, МПа	$\sigma_T$	
6.	Расчетное сопротивление арматуры, МПа	$R_s$	
2. Геометрические характеристики сечения			
7.	Высота сечения балки, мм	$h$	
8.	Рабочая высота балки, мм	$h_0$	
9.	Ширина сечения балки, мм	$b$	
10.	Площадь сечения продольной арматуры, $\text{см}^2$	$A_s$	

Ожидаемый характер разрушения балки (по растянутой или по сжатой зоне) определяется из сравнения относительной высоты сжатой зоны бетона  $\xi_{пр} = \frac{x_{пр}}{h_0}$  и предельной относительной высоты сжатой зоны  $\xi_R$ , определяемой по формуле (1.5). Если  $\xi \leq \xi_R$ , то разрушение балки начинается по растянутой зоне

с достижением предела текучести арматурой, а в случае  $\xi \geq \xi_R$ , балка разрушается по сжатой зоне бетона.

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{SR} * \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)}{\sigma_{sc,u}}} \quad (1.5)$$

где  $\sigma_{SR}$ - приращение напряжений в растянутой арматуре. Для элементов без предварительного напряжения  $\sigma_{SR} = R_S$ ;  $\sigma_{sc,u}$  – напряжение в условной сжатой арматуре. При учете кратковременных нагрузок и нагрузок непродолжительного действия  $\sigma_{sc,u} = 400$  Мпа;  $\omega$ - характеристика сжатой зоны бетона, определяется по формуле 1.6.

$$\omega = \alpha - 0,008 * R_B \quad (1.6)$$

где  $\alpha$  - коэффициент, принимаемый в зависимости от вида бетона (для тяжелого бетона  $\alpha=0.85$ , для легкого  $\alpha=0.8$ )

Расчет ожидаемого разрушающего момента  $M_{ож}$  и разрушающей нагрузки  $2P_{ож}$  выполняют при фактических характеристиках прочности материалов  $R_{пр}^{\phi}$ ,  $\sigma_T$  (см. табл.1.1) по формулам (1.1) - (1.7).

1.4.2. Фактическую несущую способность балки определяют путем статического нагружения двумя сосредоточенными силами. Нагрузку на балку прикладывают ступенями величиной не более 10% от контрольной разрушающей нагрузки (см. п.1.4.5.). Испытание балки выполняют до разрушения (исчерпания несущей способности) признаком которого является начало текучести растянутой арматуры. Начало текучести фиксируется при измерениях удлинений арматуры. Удлинение арматуры, соответствующее началу текучести формула 1.7.

$$\Delta l = \frac{\sigma_T}{E_s} \quad (1.7)$$

где  $E_s$  модуль упругости арматуры,  $l$  – база тензометра, мм.

1.4.3. Измерения деформаций бетона и арматуры, прогибов балки выполняют с помощью тензорезисторов с базой 50 и 20 мм или механических тензометров с базой 100 и 20 мм и индикаторов часового типа с ценой деления 0.01 мм. В процессе испытаний ведут запись в таблице 1.2. По результатам измерений на рис.1.3, 1.4 строят графики деформаций бетона в сжатой зоне и растянутой арматуре, прогибов балки в середине пролета.

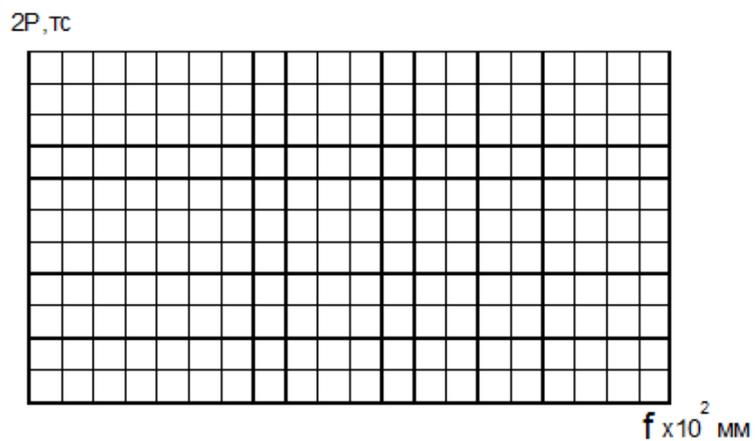


Рис.1.3 График прогибов балки в середине пролета

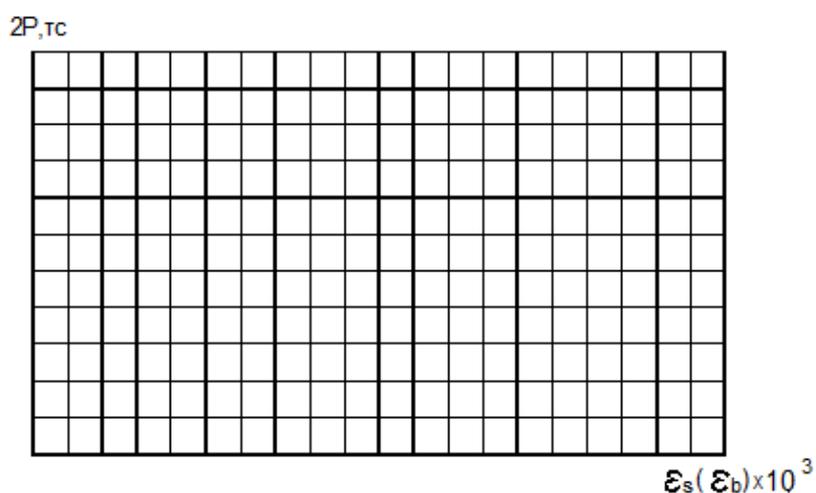


Рис.1.4. Графики деформаций бетона сжатой зоны и растянутой арматуры

1.4.4. Исследование характера образования трещин и разрушения выполняется визуально, в процессе испытаний балки. Картина образования трещин фиксируется на развертке поверхности балки (см. рис.1.5).

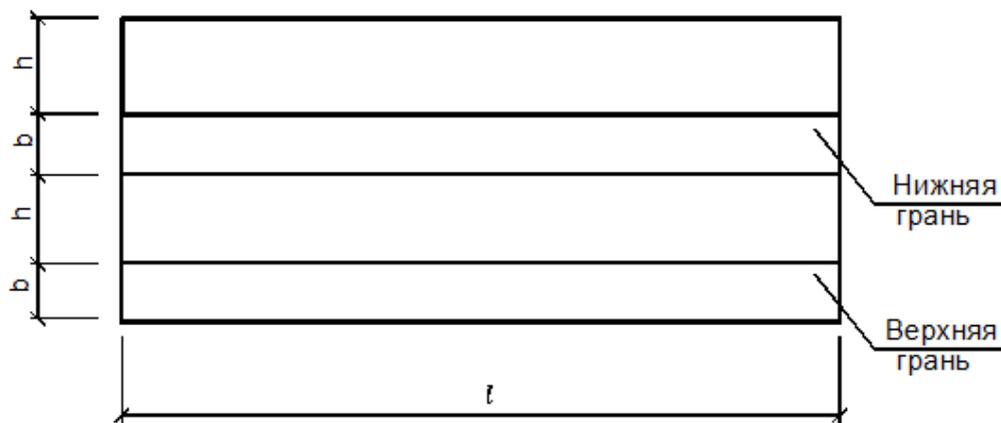


Рис.1.5.Схема трещинообразования (развертка поверхности балки)

1.4.5. Оценку прочности балки согласно /5/ выполняют по значению максимальной (разрушающей) нагрузки  $2P_{\phi}$  (формула 1.8).

$$2P_{\phi} = 2P + \frac{q \cdot l^2}{4 \cdot a} \quad (1.8)$$

зафиксированной к моменту появления признаков, свидетельствующих об исчерпании несущей способности (см. п.1.4.2.).

Таблица 1.2

Показания приборов в процессе испытания

Номера этапов нагружения	Нагрузка на балку, 2Р кгс	Тензомер Т-1			Тензомер Т-2			Тензомер Т-3			Индикатор И-4	
		Цена деления			Цена деления			Цена деления			Цена деления	
		База			База			База			База	
		Отсчеты	Разница	$\frac{\Delta l}{l}$	Отсчеты	Разница	$\frac{\Delta l}{l}$	Отсчеты	Разница	$\frac{\Delta l}{l}$	Отсчеты	Разница
1												
2												
3												
.												

Оценка прочности проводится на основании сопоставления фактической разрушающей нагрузки  $2P_{\phi}$  с контрольной  $P_K$ , которая получается умножением расчетной нагрузки  $2P_{пр}$  на коэффициент безопасности  $C$  (табл. 1.3). Прочность балки считается обеспеченной, если  $2P_{\phi} \geq P_K$ .

Таблица 1.3

Коэффициенты безопасности

Класс арматуры	Коэффициент С
А-I, А-II	1.25
А-III, АТ-III, А-IIIв Вр-I	1.3

Значения проектных и фактических разрушающих нагрузок должны неизбежно отличаться, что объясняется:

- учетом коэффициентов надежности по материалу и статистической изменчивости прочности при назначении расчетных сопротивлений бетона и арматуры;
- отличием принятых в расчете и фактических геометрических характеристик сечения;
- погрешностями в показаниях измерительных приборов;

- несоответствием принятой и действительной расчетных схем и др. случайными факторами;

Отличие в ожидаемой и фактической разрушающих нагрузках обычно невелико, так как при расчетах использованы фактические прочностные материалы без учета их изменчивости. Результаты сравнения величин разрушающей нагрузки сводятся в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Сравнение величин разрушающей нагрузки

Наименование работы	Фактическая разрушающая нагрузка при испытаниях $2P_{ф}, тс$	Проектная разрушающая нагрузка $2P_{пр}, тс$	Ожидаемая разрушающая нагрузка $2P_{ож}, тс$	Отношения	
				$\frac{P_{ф}}{P_{ож}}$	$\frac{P_{ф}}{P_{пр}}$

### 1.5. Содержание отчета

В отчете приводят расчеты прочности балки, схему образования трещин, графики прогибов в середине пролета, графики деформаций бетона сжатой зоны и растянутой арматуры; указывают их особенности (характер графиков деформаций и прогибов, излом на графиках после образования первых трещин и др.), отмечают соответствие прочности балки условию  $2P_{ф} \geq P_{к}$ .

### Контрольные вопросы

1. Какие задачи необходимо решить в процессе испытания и после его окончания?
2. Какие прочностные и геометрические характеристики определяют прочность нормального сечения изгибаемого элемента?
3. Какие исходные данные и расчетные предпосылки положены в основу определения расчетного изгибающего момента?
4. Описать схему испытания железобетонной балки, охарактеризовать измерительные приборы.
5. Как определяются относительные деформации бетона и арматуры?
6. Описать график деформаций бетона в сжатой зоне.
7. Описать график деформаций арматуры.
8. Описать график прогибов балки под нагрузкой.
9. Описать схему развития трещин и характер разрушения балки.
10. Чем обусловлены расхождения между величинами расчетной и фактической разрушающей нагрузок на балку?
11. Во сколько раз фактическая разрушающая нагрузка на балку должна превышать проектную для того, чтобы прочность изделия могла быть признана достаточной?

### Литература

[1, с.1-14; 2, с.1-22; 3, с.1-4; 4, с.1-14; 5, с.1-17; 6, с.50-67]

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО СЖАТОЙ ЗОНЕ СЕЧЕНИЯ

2.1. **Цель работы** – исследовать прочность нормального сечения балки с разрушением по сжатой зоне, которое характерно для изгибаемых элементов с избыточным содержанием растянутой арматуры.

2.2. Задание включает те же пункты, что и в работе №1.

2.3. Краткие теоретические сведения

В железобетонных сечениях с чрезмерно большим содержанием арматуры (переармированные сечения) разрушение начинается в бетоне сжатой зоны, а напряжения в растянутой арматуре не достигают предельных значений. Независимо от свойств арматурных сталей, разрушение носит хрупкий характер и происходит при весьма небольших прогибах балки. Поскольку прочность арматуры в таких элементах используется не полностью, они считаются неэкономичными и без специального обоснования не применяются.

2.4. Выполнение работы

2.4.1. Расчет несущей способности балки выполняется с учетом фактических размеров и схемы армирования элемента, схемы приложения нагрузок, при расчетной и фактической прочности материалов.

Геометрические размеры и схему армирования определяют, как в работе №1, и указывают на рис.1.1, схему приложения нагрузок и расположение приборов – на рис. 1.2. Характеристики прочности материалов определяют как и в работе №1, результаты представляют в табл. 1.1.

Расчет проектной прочности балки выполняют с учетом расчетных характеристик материалов, при этом учитывается, что в стадии разрушения элемента напряжения в растянутой арматуре не достигают предельных значений.

Ожидаемый характер разрушения балки определяют из сравнения величин  $\xi_{пр}$  и  $\xi_R$  (см. работу №1). Для предусмотренного в работе №2 характера разрушения балки (по сжатой зоне) должно выполняться условие  $\xi_{пр} > \xi_R$ . При разрушении элемента по сжатому бетону, проектную относительную высоту сжатой зоны  $\xi_{пр}^*$  согласно /6/ определяют из совместного решения уравнений (2.1) и (2.2):

$$R_b * b * \xi_{пр}^* * h_0 - \sigma_s * A_s = 0 \quad (2.1)$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} \left( \frac{\omega}{\xi_{пр}^*} - 1 \right) \quad (2.2)$$

откуда

$$\xi_{пр}^{*2} - D * \xi_{пр}^* - D * \omega = 0 \quad (2.3)$$

Из уравнения (2.3)

$$\xi_{пр}^* = -\frac{1}{2} \left[ D - \sqrt{D^2 + 4 * \omega} \right] \quad (2.4)$$

где

$$D = \frac{\sigma_{sc,u}}{1 - \frac{\omega}{1,1}} * \frac{A_s}{R_b * b * h_0} \quad (2.5)$$

В выражениях (2.1)-(2.5)  $\sigma_{sc,u}$ ,  $\omega$  см формулу (1.4),  $\sigma_s$  – напряжения в растянутой арматуре ( $\sigma_s < R_s$ ).

Высоту сжатой зоны сечения находят по формуле

$$x_{пр} = \xi_{пр}^* * h_0 \quad (2.6)$$

Проектный изгибающий момент  $M_{пр}$  и проектную величину разрушающей нагрузки  $2P_{пр}$  определяют по формулам (1.2), (1.3) с учетом  $x_{пр}$  и подстановкой расчетных характеристик материалов  $R_b$ ,  $R_s$ .

Ожидаемую относительную высоту сжатой  $\xi_{ож}^*$  и значение  $x_{ож}$  определяют по формулам (2.4) – (2.6) с подстановкой в (2.5) фактических характеристик прочности материалов. Величины  $M_{ож}$  и  $2P_{ож}$  находят по формулам (1.2), (1.3) с учетом  $x_{ож}$  и прочности материалов  $R_{пр}^{\phi}$ ,  $\sigma_T$ .

2.4.2. Фактическую несущую способность балки определяют, как и в работе №1.

2.4.3. Измерение деформаций материалов и прогибов балки выполняют как и в работе №1, фиксируя показания приборов в табл. 1.2; строят графики деформаций бетона в сжатой зоне и растянутой арматуре, прогибов балки в середине пролета (рис 1.3, 1.4).

2.4.4. В процессе испытаний выполняют визуальное исследование характера образования трещин и разрушения бетона в сжатой зоне балки. Результаты наблюдений указывают на рис.1.5. Испытания выполняют до разрушения, признаком которого является начало отслоения лещадки (чешуек) по верхней грани балки.

2.4.5. Оценку прочности балки согласно /5/ выполняют по значению максимальной (разрушающей) нагрузки, зафиксированной к моменту появления признаков, свидетельствующих об исчерпании несущей способности. Оценка прочности проводится на основании сопоставления фактической разрушающей нагрузки  $2P_{ф}$  с контрольной  $P_k$ , которая получается умножением расчетной нагрузки  $2P_{пр}$  на коэффициент безопасности  $C$ . Для тяжелого, легкого и мелкозернистого бетонов  $C=1.6$ . Прочность балки считается обеспеченной, если  $2P_{ф} \geq P_k$ . Результаты сравнения величин разрушающей нагрузки приводят в таблице 1.4.

## 2.5. Содержание отчета

В отчете приводят расчеты прочности балки, схему разрушения, графики прогибов в середине пролета, графики деформаций бетона сжатой зоны и растянутой арматуры; указывают их особенности (характер графиков деформаций и прогибов), отмечают соответствие прочности балки условию  $2R_{\phi} \geq R_K$ .

### Контрольные вопросы

1. Какие задачи необходимо решить в процессе испытания и после его окончания?
2. Какие прочностные и геометрические характеристики определяют прочность нормального сечения изгибаемого элемента?
3. Какие расчетные предпосылки положены в основу определения расчетного изгибающего момента?
4. В каком случае разрушение балки начинается по сжатой зоне?
5. Описать схему испытания железобетонной балки, охарактеризовать измерительные приборы.
6. Как определяются относительные деформации бетона и арматуры?
7. Описать график деформаций бетона в сжатой зоне.
8. Описать график деформаций арматуры.
9. Чем графики деформаций бетона и арматуры в работе №2 отличаются от тех же графиков в работе №1?
10. Описать схему развития трещин и характер разрушения балки.
11. Чем обусловлены расхождения между величинами расчетной и фактической разрушающей нагрузок на балку?
12. Во сколько раз фактическая разрушающая нагрузка на балку должна превышать проектную для того, чтобы прочность изделия могла быть признана достаточной?

### Литература

[1, с.1-14; 2, с.1-22; 3, с.1-4; 4, с.1-14; 5, с.1-17; 6, с.50-67]

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ**

3.1. **Цель работы** – исследовать прочность наклонных сечений балки при разрушении от действия поперечной силы и изгибающего момента.

3.2. **Задание:**

- выполнить расчет несущей способности балки по наклонным сечениям от действия поперечной силы;
- определить фактическую несущую способность по наклонным сечениям на действие поперечной силы методом статического нагружения;

- исследовать характер образования трещин и разрушения балки от действия поперечной силы;
- выполнить измерение деформаций бетона в направлениях действия главных напряжений;
- выполнить оценку прочности балки при разрушении по наклонным сечениям от действия поперечной силы;
- ознакомиться с конструктивными требованиями к анкеровке продольной арматуры за гранью свободной опоры;
- исследовать характер разрушения балки по наклонным сечениям от действия изгибающего момента;
- оформить отчет;
- ответить на контрольные вопросы.

### 3.3. Краткие теоретические сведения

В изгибаемых элементах вблизи опор вследствие совместного действия поперечной силы и изгибающего момента возникают главные растягивающие и сжимающие напряжения. Поскольку бетон хорошо работает на сжатие, главные сжимающие напряжения опасны в основном в элементах с тонкой стенкой. Более опасны главные растягивающие напряжения. Когда величина этих напряжений достигает прочности бетона при растяжении, в нем образуется наклонная трещина, разделяющая приопорный участок элемента на две части, соединенные бетоном в сжатой зоне над трещиной и продольной арматурой, хомутами и отгибами – в растянутой зоне. С повышением внешней нагрузки, разрушение от действия главных растягивающих напряжений может произойти по одному из случаев.

Случай 1. При наличии достаточно сильной, хорошо заанкеренной продольной арматуры, препятствующей взаимному повороту разделенных трещиной частей приопорного блока, разрушение происходит вследствие среза бетона сжатой зоны, а напряжения в стержнях поперечной и наклонной арматуры достигают предела текучести. Такой характер разрушения вызывается преимущественно действием поперечной силы.

Случай 2. При слабой продольной арматуре, напряжения в ней, а также в хомутах и отгибах, пересекаемых наклонной трещиной, достигают предела текучести. Под действием изгибающего момента происходит взаимный поворот частей приопорного блока относительно центра тяжести сжатой зоны над трещиной. С увеличением нагрузки трещина раскрывается, высота сжатой зоны уменьшается и происходит раздробление бетона в сжатой зоне. При недостаточной анкеровке продольной арматуры, разрушение может произойти вследствие ее выдергивания из опорной зоны элемента.

В соответствии с рассмотренными случаями разрушения, лабораторная работа разделяется на две части: 3А и 3Б.

### 3.4. Выполнение работы

#### 3.4.1. Работа 3А (Разрушение от действия поперечной силы)

3.4.1.1. Расчет несущей способности балки по наклонным сечениям от действия поперечной силы выполняется с учетом фактических размеров и схемы армирования элемента.

Геометрические размеры и схему армирования, схему нагружения балки, характеристики прочности материалов устанавливают, как и в работе №1, указывают на рис. 1.1, 1.2 и в табл. 3.1.

Расчет проектной прочности выполняют по формулам (3.1) – (3.5) при расчетных характеристиках материалов из табл. 3.1.

Поперечную силу, воспринимаемую бетоном сжатой зоны над наклонным сечением, определяют по формуле

$$Q_b^{пр} = \varphi_{b2} * R_{bt} * b * \frac{h_0^2}{C} \geq \varphi_{b3} * R_{bt} * b * h_0 \quad (3.1)$$

где  $C$  – длина проекции наклонного сечения на продольную ось элемента; значения коэффициентов  $\varphi_{b2}$  и  $\varphi_{b3}$  принимаются в зависимости от вида бетона по табл. 3.1.

Величина  $C$  принимается равной расстоянию от оси опоры до линии действия ближайшей к ней силы (см. рис. 1.2). Значение  $C$  принимается не более

$$C \leq \left( \frac{\varphi_{b2}}{\varphi_{b3}} \right) * h_0$$

Таблица 3.1

Значения коэффициентов  $\varphi_{b2}$  и  $\varphi_{b3}$

Бетон	$\varphi_{b2}$	$\varphi_{b3}$
Тяжелый	2	0.6
Мелкозернистый	1.7	0.5

Поперечную силу, воспринимаемую поперечными стержнями (хомутами) определяют из выражений (3.2) – (3.4).

$$Q_{sw}^{пр} = q_{sw}^{пр} * C_0^{пр} \quad (3.2)$$

$$q_{sw}^{пр} = \frac{R_{sw} * A_s}{S} \quad (3.3)$$

$$C_0^{пр} = \sqrt{\frac{\varphi_{b2} * R_{bt} * b * h_0^2}{q_{sw}}} \quad (3.4)$$

где  $q_{sw}$  – погонное усилие в поперечных стержнях, отнесенное к единице длины элемента;  $S$  – шаг поперечных стержней;  $A_{sw}$  – площадь сечения хомутов в одной плоскости;  $C_0$  – длина проекции наклонного сечения, на которой учитывается работа хомутов. Величина  $C_0$  принимается не более  $C$  и не более  $2h_0$ , а также не менее  $h_0$ .

Поперечная сила, воспринимаемая наклонным сечением железобетонного элемента с учетом собственного веса балки:

$$Q^{pp} = Q_b^{pp} + Q_{sw}^{pp} - \frac{q^*l}{2} \quad (3.5)$$

где  $q$  – распределенная нагрузка от собственного веса балки (определяется, как и в работе №1).

Расчет ожидаемой разрушающей поперечной силы  $Q^{ож}$  выполняют при фактических характеристиках прочности  $R_{bt}^\phi$ ,  $R_{sw}^\phi$  из табл. 3.1 по формулам (3.1) - (3.5).

3.4.1.2. Фактическую несущую способность балки по наклонным сечениям определяют путем статического нагружения двумя сосредоточенными силами, при этом с целью уменьшения изгибающего момента, точки приложения сил смещают к опорам. Нагрузку на балку прикладывают ступенями, величиной не более 10% от величины контрольной разрушающей нагрузки:

$$2P_k = 2Q_k \quad (3.6)$$

значение  $Q_k$  см. п.3.4.1.4.

Испытание балки выполняют до разрушения (исчерпания несущей способности), признаком которого является начало текучести поперечной арматуры.

Таблица 3.2

Исходные данные для расчетов прочности балки

Величина		Обозначение	Числовое значение
1. Характеристики прочности			
1.	Кубиковая прочность бетона при сжатии, МПа	$\bar{R}$	$\bar{R}(1-\chi^*v_m)$ $0,233*\sqrt[3]{\bar{R}^2}$
2.	Гарантируемая кубиковая прочность бетона при сжатии с обеспеченностью 0.95 (класс бетона при сжатии), МПа		
3.	Прочность бетона при осевом растяжении, МПа Расчетное сопротивление бетона при растяжении, МПа	B $R_{bt}^\phi$	
4.	Предел текучести поперечной арматуры, МПа Расчетное сопротивление поперечной арматуры, МПа	$R_{bt}$	
5.		$R_{sw}^\phi$	
6.		$R_{sw}$	

2. Геометрические характеристики сечения			
7.	Высота сечения балки, мм	h	
8.	Рабочая высота балки, мм	h <sub>0</sub>	
9.	Ширина сечения балки, мм	b	
10.	Площадь сечения поперечной арматуры в одной плоскости, см <sup>2</sup>	A <sub>sw</sub>	

Начало текучести фиксируется при измерениях деформаций в направлении главных растягивающих напряжений (тензометр Т-5 на рис. 1.2). Отчет по тензометру, соответствующий началу текучести:

$$\Delta l = \frac{\sqrt{2}}{2} * \frac{\sigma_T}{E_s} * l \quad (3.7)$$

3.4.1.3. Исследование характера трещинообразования выполняется так же, как и в работе №1.

3.4.1.4. Оценку прочности балки выполняют по значению максимальной поперечной силы  $Q_{\phi} = P_{\phi} + \frac{q^* l}{2}$  воспринимаемой наклонным сечением балки к моменту появления признаков, свидетельствующих об исчерпании несущей способности. Оценка прочности согласно /5/ проводится на основании сопоставления фактической поперечной силы  $Q_{\phi}$  с контрольной  $Q_{к}$ , которая получается умножением расчетной поперечной силы  $Q_{пр}$  на коэффициент безопасности С (см. табл. 1.3). Прочность балки считается обеспеченной если  $Q_{\phi} \geq Q_{к}$ . Результаты сравнения величин поперечной силы, воспринимаемой наклонным сечением балки, сводятся в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Сравнение величин поперечной силы

Наименование работы	Фактическая поперечная сила, воспринимаемая наклонным сечением балки $Q_{\phi}$ , тс	Проектная поперечная сила $Q_{пр}$ , тс	Ожидаемая поперечная сила $Q_{ож}$ , тс	Отношения	
				$\frac{Q_{\phi}}{Q_{ож}}$	$\frac{Q_{\phi}}{Q_{пр}}$

### 3.4.2. Работа 3Б (Разрушение от действия изгибающего момента)

3.4.2.1. В соответствии с требованиями п. 5.15 /6/ для обеспечения анкеровки растянутых при изгибе продольных стержней арматуры, заводимых на грань опоры на крайних свободных опорах изгибаемых элементов, длина запуска стержней за внутреннюю грань свободной опоры должна быть не менее 10 диаметров стержня, если прочность наклонного сечения по поперечной силе

без поперечной арматуры не обеспечена. При недостаточной анкеровке продольных стержней за гранью свободной опоры происходит разрушение балки в наклонном сечении от выдергивания арматуры из бетона на опоре. Это наиболее опасный вид разрушения балки, так как выдергивание арматуры из бетона опоры происходит хрупко, сопровождается раскалыванием бетона опорной части балки вдоль стержней продольной арматуры и мгновенной полной потерей несущей способности балки.

3.4.2.2. С целью исследования характера разрушения, балку испытывают по схеме на рис. 1.2, но опоры балки располагают так, чтобы длина анкеровки продольных стержней за гранью опоры была меньше, чем 10 диаметров этих стержней.

Испытание балки проводят так же, как и в работе 3А, но измерительные приборы не устанавливают. При испытании фиксируют величину нагрузки при образовании косой трещины и при потере несущей способности балки от выдергивания продольной арматуры из бетона опорной части балки.

Величины разрушающих нагрузок в работе 3А и 3Б сравнивают. Если при испытании не была соблюдена нормируемая глубина анкеровки продольной арматуры на опоре, то разрушающая нагрузка в работе 3Б будет меньше, чем в работе 3А и экспериментально будет доказана необходимость соблюдения при проектировании железобетонных конструкций не только расчетных норм, но и указаний /6/ по конструированию.

#### 1.5. Содержание отчета

В отчете приводят расчеты прочности балки по наклонным сечениям на действие поперечной силы, схемы разрушения в работах 3А и 3Б; графики прогибов в середине пролета, графики деформаций бетона в направлениях главных напряжений, действующих в приопорной зоне в работе 3А, указывают их особенности (характер графиков деформаций и прогибов), отмечают соответствие прочности балки условию  $Q_{\phi} \geq Q_K$  в работе 3А.

### Контрольные вопросы

1. Какие задачи решались в процессе испытания балки и после его окончания?
2. Какие геометрические и прочностные характеристики определяют прочность балки по наклонному сечению?
3. Какие расчетные предпосылки положены в основу определения расчетной поперечной силы?
4. В каком случае разрушение балки происходит от поперечной силы?
5. В каком случае разрушение балки происходит от действия изгибающего момента в наклонном сечении?
6. Описать схему испытания балки.
7. Какими приборами измерялись деформации при испытании?
8. Описать графики деформаций бетона в наклонном сечении.

9. Описать график прогибов балки под нагрузкой.
10. Чем отличаются графики деформаций в бетоне, построенные по результатам измерения приборами Т-1 и Т-2?
11. Чем вызвано расхождение между опытными и расчетными значениями поперечных сил?
12. Во сколько раз фактическая разрушающая нагрузка должна превысить расчетную проектную величину для того, чтобы прочность балки по наклонному сечению была признана достаточной?

#### Литература

[1, с.1-14; 2, с.1-22; 3, с.1-4; 4, с.1-14; 5, с.1-17; 6, с.67-73]

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – М.: Издательство стандартов, 1985.
2. ГОСТ 22690 – 2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – М.: Стандартиформ, 2019 год
3. Рекомендации по определению прочности бетона эталонным молотком Кашкарова по ГОСТ 22690.2-77. – М.: Стройиздат, 1985.
4. ГОСТ 12004 – 81. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение. – М.: Издательство стандартов, 1981.
5. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. - М.: Стандартиформ, 2019 год
6. СНиП 2.03.01 – 84. Бетонные и железобетонные конструкции. - М.: Госстрой СССР, 1989.

### ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. Определение прочности нормального сечения железобетонной балки с разрушением по растянутой зоне.....	3
Лабораторная работа № 2. Определение прочности нормального сечения железобетонной балки с разрушением по сжатой зоне сечения.....	11
Лабораторная работа № 3. Определение прочности наклонных сечения железобетонной балки.....	13
Библиографический список.....	19

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НОРМАЛЬНЫХ И  
НАКЛОННЫХ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению лабораторных работ для студентов специальностей  
08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» и  
08.03.01 «Строительство»  
всех форм обучения

**Составители:**  
**Поликутин Алексей Эдуардович,**  
**Зябухин Павел Алексеевич**

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 10.02.2022.  
Усл. печ. л. 1,3.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84