



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

**СТРОИТЕЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

Издательство МИСИ – МГСУ

В.И. Колчунов, Б.К. Джамуев

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Учебно-методическое пособие



ISBN 978-5-7264-2373-9

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2020

Москва  
2020

УДК 624.016  
ББК 38.53  
К60

*Рецензенты:*

советник РААСН, доктор технических наук, профессор *А.Г. Тамразян*,  
заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ;  
доктор технических наук, профессор *А.В. Турков*, заведующий кафедрой строительных  
конструкций и материалов ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»

**Колчунов, В.И.**

К60 Экспериментальные исследования железобетонных конструкций [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / В.И. Колчунов, Б.К. Джамуев ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, кафедра железобетонных и каменных конструкций. — Электрон. дан. и прогр. (7,5 Мб). — Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. — Режим доступа : <http://lib.mgsu.ru/>. — Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7264-2373-9 (сетевое)

ISBN 978-5-7264-2374-6 (локальное)

Учебно-методическое пособие содержит краткое описание содержания и методики проведения лабораторных работ, направленных на углубленное изучение студентами основ экспериментального исследования свойств железобетонных конструкций.

Для обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01 Строительство, 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений.

*Учебное электронное издание*

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Лабораторная работа № 1. ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ.....	6
Лабораторная работа № 2. ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ .....	16
Лабораторная работа № 3. ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ НА ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ С БОЛЬШИМ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ .....	24
Лабораторная работа № 4. ИСПЫТАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ .....	33
Лабораторная работа № 5. УСТРОЙСТВА, ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ .....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ. Протоколы испытаний .....	58

## ВВЕДЕНИЕ

При изучении студентами курса «Железобетонные и каменные конструкции» предусмотрено выполнение лабораторных работ, направленных на углубленное изучение и понимание физических основ, заложенных в теорию расчета железобетонных сооружений, и основных положений проектирования железобетонных конструкций, введенных в действующие нормативные документы.

В соответствии с учебными планами за учебный период (семестр) необходимо выполнить 4 лабораторные работы № 1–4 (с общим объемом учебного времени 8 ч) — для студентов очной формы обучения и 1 лабораторную работу № 5 (с общим объемом учебного времени 2 ч) — для студентов заочной формы обучения. Лабораторные работы посвящены испытанию железобетонных элементов при различных видах напряженного состояния. При выполнении лабораторных работ студенты углубленно изучают поведение железобетонных конструкций на различных стадиях их загрузки и получают уверенность в правильности понимания используемых в России методов расчета конструкций. Кроме того, будущие инженеры-строители знакомятся с методологией проведения испытаний конструкций, устройствами и приборами, используемыми при испытании, а также методами определения прочностных и деформативных характеристик конструкционных материалов.

Учебно-методическое пособие включает в себя:

- сведения о характере работы изгибаемых и сжатых железобетонных элементов на всех уровнях их нагружения (в том числе при разрушении);
- данные о материалах, конструкциях экспериментальных образцов, приборах, оборудовании и схемах нагружения;
- основные положения по расчету изучаемых элементов;
- рекомендации по обработке экспериментальных данных и составлению обоснованных выводов о результатах испытаний.

По результатам испытаний и теоретических расчетов студентами оформляются протоколы по формам, указанным в Приложении к настоящему учебно-методическому пособию. В протоколах выполняется анализ полученных данных, приводятся сравнение опытных и теоретических значений исследуемых параметров, дается пояснение о причинах отклонений в этих величинах. Представленные в настоящем пособии лабораторные работы могут проводиться по одному из двух вариантов:

- испытание реальных физических образцов, выполненных из железобетона на силовом оборудовании;
- виртуальные испытания компьютерных моделей балок с использованием программных комплексов или отдельных программ.

Защита лабораторных работ производится после выполнения одной или нескольких работ при наличии правильно оформленного протокола. В конце каждой лабораторной работы содержатся контрольные вопросы, позволяющие лучше освоить изучаемый материал и подготовиться к ее защите.

Данное учебно-методическое пособие предлагается использовать как дополнительный материал при освоении студентами курса «Железобетонные и каменные конструкции».

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.**

## **ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ**

### **Цели работы:**

- изучение напряженно-деформированного состояния изгибаемой железобетонной балки на различных стадиях ее загрузки вплоть до разрушения по нормальному сечению;
- определение расчетных характеристик бетона и арматуры на момент испытаний, момента трещинообразования и разрушающего момента, максимального прогиба конструкции;
- установление экспериментальных значений контролируемых величин и их сопоставление с расчетными данными с последующим анализом полученных результатов и выводами по работе в целом.

### **Особенности напряженно-деформированного состояния в балке при действии изгибающего момента**

При чистом изгибе железобетонной балки возникают напряжения в сечениях, нормальных к продольной оси элемента. В процессе постепенного нагружения в этих сечениях, расположенных в зоне чистого изгиба, можно наблюдать 3 характерные стадии напряженно-деформированного состояния.

Стадия I — стадия квазиупругой работы бетона. Из-за относительно небольших напряжений в бетоне и арматуре в них развиваются большей частью упругие деформации. Эпюры напряжений в бетоне сжатой и растянутой зон имеют треугольную форму или близкую к треугольной (рис. 1.1, а), бетон и арматура деформируются совместно благодаря имеющемуся между ними сцеплению.

С увеличением нагрузки в бетоне растянутой зоны развиваются неупругие деформации, эпюра напряжений становится криволинейной, а ее наибольшая ордината достигает значения предельного сопротивления бетона растяжению. В этот момент наступает стадия Ia (рис. 1.1, б).

Стадия II начинается с появлением трещин в растянутой зоне бетона (рис. 1.1, в). Растягивающие напряжения в сечении с трещиной воспринимаются растянутой арматурой и участком растянутого бетона над трещиной. С увеличением нагрузки эпюра напряжений в сжатом бетоне искривляется, так как начинают проявляться неупругие деформации, но напряжения остаются меньше призмочной прочности бетона на сжатие (временного сопротивления сжатию). Напряжения в растянутой арматуре в конце стадии II могут достигать физического предела текучести.

Стадия III — стадия, при которой происходит разрушение изгибаемого железобетонного элемента. При этом разрушение может произойти по одному из двух случаев.

Случай 1 (рис. 1.1, г). Разрушение по случаю 1 происходит при развитии больших пластических деформаций в растянутой арматуре, т.е. когда напряжения в растянутой арматуре достигают ее предела текучести. Происходит увеличение ширины и высоты раскрытия трещин, а также уменьшение высоты сжатой зоны бетона. Это приводит к росту напряжений в сжатом бетоне, и когда эти напряжения достигают призмочной прочности (временного сопротивления сжатию), происходит раздробление бетона сжатой зоны и разрушение балки. При этом резко увеличиваются прогибы конструкции.

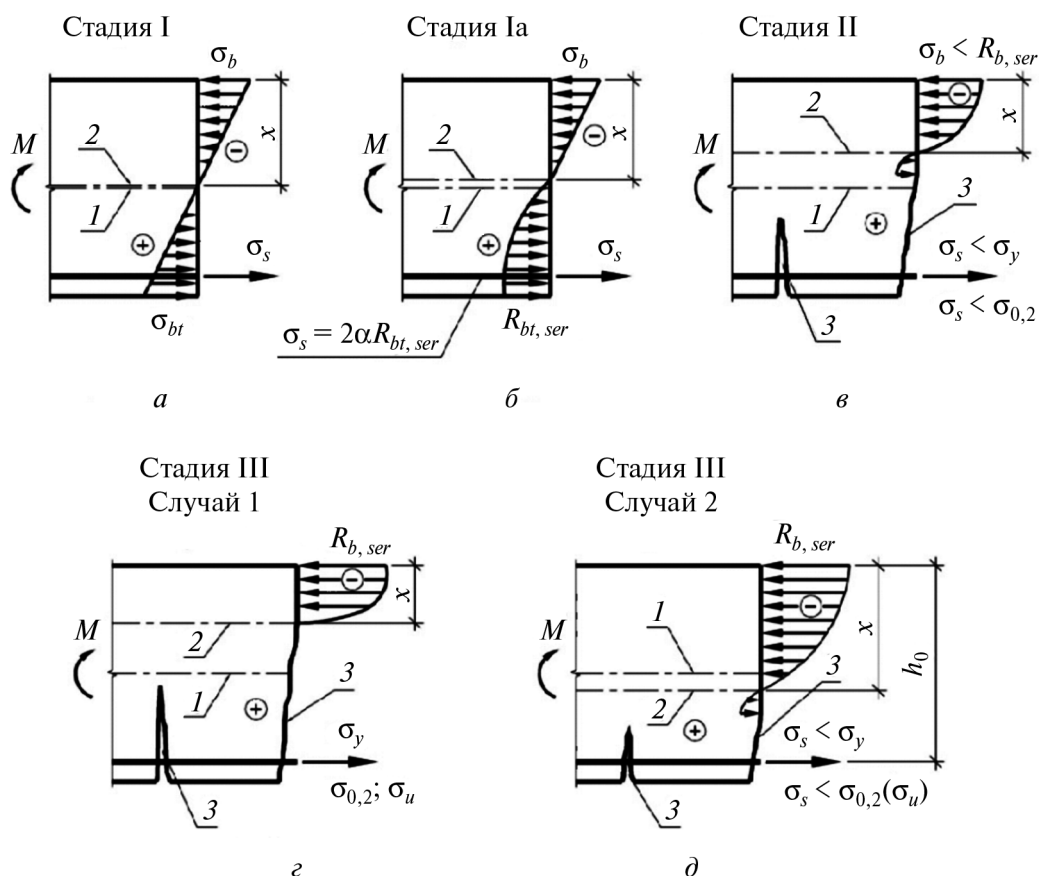


Рис. 1.1. Стадии напряженно-деформированного состояния железобетонного изгибаемого элемента:

1 — ось, проходящая через центр тяжести приведенного сечения;  
2 — нейтральная ось; 3 — трещины

Рассматриваемый вид разрушения элемента по характеру является пластическим и происходит при постоянной или незначительно увеличивающейся нагрузке. Непосредственно перед разрушением прогиб балки может достигать 1/25...1/50 пролета, а ширина раскрытия трещин 5–10 мм. Такой случай разрушения называют «разрушение по арматуре».

Случай 2 (рис. 1.1, д). Разрушение по случаю 2 происходит, когда напряжения в сжатом бетоне достигают предельного значения (временного сопротивления сжатию). При этом напряжения в растянутой арматуре не превышают предела текучести. Рассматриваемый вид разрушения элемента по характеру является хрупким и может наблюдаться в переармированных элементах (с избыточным содержанием растянутой арматуры).

Разрушение по случаю 2 происходит при малых прогибах и незначительной ширине раскрытия трещин, его называют «разрушением по бетону».

Хрупко также разрушаются слабоармированные элементы и элементы, армированные холоднодеформированной твердой сталью с низкой предельной растяжимостью (менее 3–4 %).

Случай разрушения может быть определен по следующему выражению:  $\xi \leq \xi_R$  — случай 1,  $\xi > \xi_R$  — случай 2, где  $\xi$  и  $\xi_R$  — соответственно относительная высота сжатой зоны бетона и ее граничное значение.

В данной лабораторной работе опытные конструкции запроектированы так, чтобы разрушение происходило по случаю 1, как наиболее приемлемое для нормальных сечений железобетонных конструкций, используемых в промышленном и гражданском строительстве.

Стадии напряженного состояния положены в основу расчета железобетонных элементов по предельным состояниям [1]. Так, расчет по несущей способности (прочности, устойчивости и выносливости) производится на стадии III. Расчет по образованию трещин — на стадии Ia; по раскрытию трещин и их закрытию — на стадии II; по деформациям — на стадии I или II в зависимости от наличия трещин.

### Сбор исходных данных

Для проведения испытаний используется опытный образец в виде балки прямоугольного сечения длиной 1300 мм ( $L$ ), шириной 100 мм ( $b$ ) и высотой 150 мм ( $h$ ). Расчетный пролет балки ( $L_0$ ) составляет 1170 мм (рис. 1.2). Балка армирована пространственным каркасом: в качестве продольной рабочей арматуры в нижней зоне балки установлено 2 стержня  $\varnothing 12$  A400, в качестве поперечной — стержни  $\varnothing 3$  B500. Рабочая высота сечения ( $h_0$ ) составляет 120 мм. Для обеспечения разрушения опытного образца (балки) по нормальному сечению поперечная арматура установлена только в крайних третях пролета.

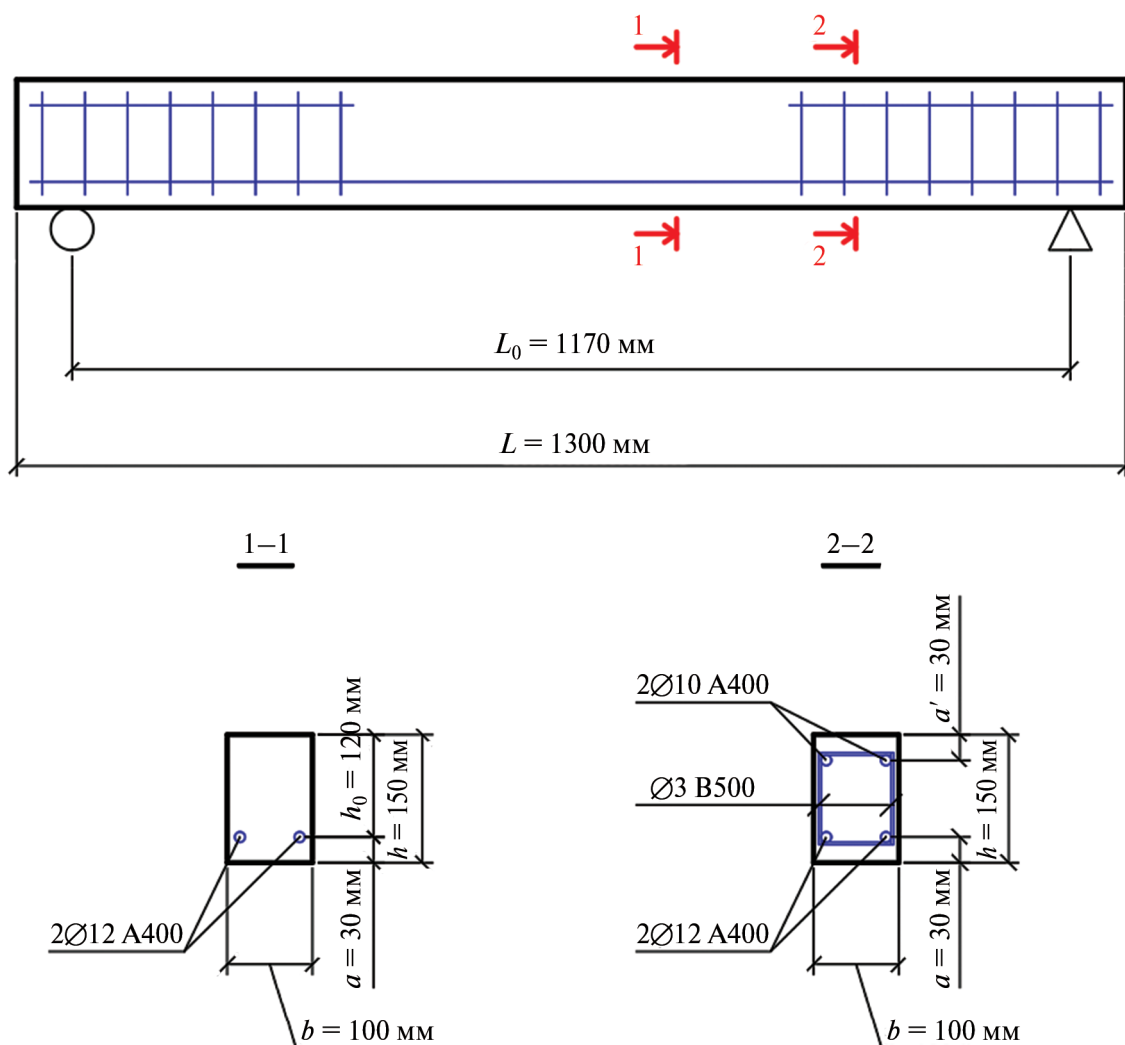


Рис. 1.2. Схема армирования опытной конструкции балки

Среднее значение кубиковой прочности, призмная прочность, прочность бетона при осевом растяжении, начальный модуль бетона и расчетное сопротивление арматуры растяжению определяются путем непосредственных испытаний образцов (бетонных кубиков и стержней арматуры).

Для определения прочностных характеристик бетона, использованного при изготовлении опытного образца (балки), предварительно производятся испытания 3-х бетонных кубов с ребром 150 мм. В соответствии с указаниями ГОСТ 10180–2012 [3] кубы должны быть изготовлены из бетона рабочего состава и находившегося в тех же условиях твердения, что и опытный образец балки. Испытания кубов необходимо производить не менее чем через 28 дней твердения в условиях, определяемых ГОСТ 10180–2012 [3]. По результатам испытаний кубов определяется среднее значение кубиковой прочности бетона ( $R$ ):

$$R = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}, \quad (1.1)$$

где  $R_1, R_2, R_3$  — кубиковая прочность соответственно 1-го, 2-го и 3-го образцов, МПа.

По величине среднего значения кубиковой прочности определяется призмная прочность бетона ( $R_b$ ) опытной балки:

$$R_b = (0,77 - 0,00125R)R. \quad (1.2)$$

Прочность бетона при осевом растяжении ( $R_{br}$ ), отвечающая средней кубиковой прочности, определяется по формуле:

$$R_{br} = \frac{5R}{45 + R}. \quad (1.3)$$

Начальный модуль деформаций бетона ( $E_b$ ) определяется по результатам испытаний бетонных призм по ГОСТ 24452–80 [5]. В первом приближении начальный модуль деформаций может быть вычислен по значению средней кубиковой прочности бетона по формуле:

$$E_b = \frac{55000R}{27 + R}. \quad (1.4)$$

Для определения прочностных характеристик рабочей арматуры проводятся испытания 3-х образцов из арматурных стержней  $\varnothing 12$  А400 на растяжение по ГОСТ 12004–81 [6]. По результатам испытаний образцов определяются значения физического предела текучести для каждого образца ( $\sigma_{yi}$ ). На основе этих данных рассчитывается фактическое (опытное) сопротивление ( $R_s$ ) арматуры растяжению (среднее значение физического предела текучести):

$$R_s = \frac{\sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3}}{3}. \quad (1.5)$$

### **Определение теоретического момента трещинообразования и разрушающего момента**

Опытный образец запроектирован таким образом, что его разрушение по нормальному сечению происходило по случаю 1 ( $\xi \leq \xi_R$ ). При этом сжатая (расположенная в верхней зоне сечения) продольная арматура в работе не учитывается, так как выполняется следующее условие:  $x \leq 2a'$ . Контрольные нагрузки по раскрытию трещин и деформациям назначаются для стадии II (стадии эксплуатации).



Перед выполнением расчетов необходимо определить характеристики приведенного сечения.

Коэффициент приведения арматуры к бетону ( $\alpha_s$ ) определяется по формуле:

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_b}, \quad (1.6)$$

где  $E_s$  — модуль упругости арматуры, МПа;  $E_b$  — начальный модуль деформаций бетона, МПа.

Площадь приведенного сечения ( $A_{red}$ ) определяется по формуле:

$$A_{red} = b \cdot h + \alpha_s \cdot A_s, \quad (1.7)$$

где  $b$  — ширина сечения балки, мм;  $h$  — высота сечения балки, мм;  $A_s$  — площадь поперечного сечения рабочей арматуры, мм<sup>2</sup>.

Статический момент площади приведенного сечения относительно нижней грани сечения ( $S_{red}$ ) определяется по формуле:

$$S_{red} = \frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha_s \cdot A_s \cdot a, \quad (1.8)$$

где  $a$  — расстояние от нижней (растянутой) грани балки до центра тяжести растянутой арматуры, мм.

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до нижней грани ( $Y_0$ ) определяется по формуле:

$$Y_0 = \frac{S_{red}}{A_{red}}. \quad (1.9)$$

Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести сечения ( $I_{red}$ ) определяется по формуле:

$$I_{red} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \left( Y_0 - \frac{h}{2} \right)^2 + \alpha_s \cdot A_s (Y_0 - a)^2. \quad (1.10)$$

Момент сопротивления приведенного сечения относительно нижней грани ( $W_{red}$ ) определяется по формуле:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{Y_0}. \quad (1.11)$$

Упругопластический момент сопротивления относительно нижней грани ( $W_{pl}$ ) определяется по формуле:

$$W_{pl} = 1,75 W_{red}. \quad (1.12)$$

Далее необходимо выполнить расчет по определению момента, при котором появляются трещины ( $M_{crc,cal}$ ), и разрушающего момента ( $M_{ul,cal}$ ), а также определить нагрузки, соответствующие теоретическому моменту трещинообразования ( $F_{crc,cal}$ ) и теоретическому разрушающему моменту ( $F_{ul,cal}$ ).