

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»**

---

**24/16/11**

**Одобрено кафедрой  
«Здания и сооружения  
на транспорте»**

# **ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

**Методические указания  
к выполнению лабораторных работ на ЭВМ  
для студентов V курса**

**специальности  
270102.65 ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**Москва – 2012**

С о с т а в и т е л ь : канд. техн. наук, доцент Н.Н.ТРЕКИН

Р е ц е н з е н т ы : канд. техн. наук, профессор И.А. САЗЫКИН

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Теория расчета железобетонных конструкций основана на законах механики и многочисленных экспериментальных данных. Для более глубокого понимания работы конструкций под нагрузкой, правильной оценки напряженно-деформированного состояния, особенно стадии предшествующей разрушению, а также закрепления теоретических знаний, в учебном курсе предусмотрены лабораторные работы.

Настоящие лабораторные работы выполняются полностью на персональных ЭВМ, индивидуально каждым студентом, с анимацией процесса испытания железобетонных конструкций. Программа разработана на кафедре железобетонных конструкций МГСУ. Всего предусмотрено четыре лабораторные работы, в объем которых входит теоретическое и “экспериментальное” определение прочности, трещиностойкости и жесткости изгибаемых и внецентренно-сжатых железобетонных элементов.

Каждая работа состоит из следующих разделов: — цель и задачи исследований; — определение прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры на основе испытаний стандартных образцов в режиме анимации; — конструкция опытного образца; — схема испытания; — расчет по первой и второй группам предельных состояний; — виртуальное испытание запроектированной конструкции; — сопоставление результатов расчета с данными виртуальных испытаний.

Для усвоения материалов лабораторных работ студент должен ознакомиться с первой частью теоретического курса железобетонных конструкций и иметь представления о требованиях основного нормативного документа СНиП 2.03.01-84\* “Бетонные и железобетонные конструкции”.

## Работа № 1.

# ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ПРОЧНОСТЬ ПО НОРМАЛЬНЫМ СЕЧЕНИЯМ

**Цель работы** — изучение напряженно-деформированного состояния балки, в зоне действия изгибающего момента.

### **Задачи работы:**

1. Ознакомиться с методом расчета железобетонной балки по образованию трещин и по прочности по нормальным сечениям.
2. Провести наблюдение за характером образования и развития трещин на различных этапах нагружения вплоть до разрушения по нормальному сечению.
3. Проанализировать причины образования трещин и разрушения балки.
4. Ознакомиться с характером прогиба балки под нагрузкой и построить график зависимости “нагрузка-деформация” по опытным данным.
5. На основе сравнения теоретической и опытной разрушающей нагрузки оценить качество конструкции.

## **1.1. Определение расчетных характеристик бетона и арматуры**

### **1.1.1. Определение характеристик бетона по результатам испытания кубов**

Для определения прочности бетона при сжатии испытывают образцы-кубы, принимая за эталон куб с размером 15 см, изготовленный из того же замеса бетона, что и лабораторные конструкции. Для проведения лабораторных работ достаточно испытать три куба. Схема испытания показана на рис. 1.

Среднее значение кубиковой прочности бетона по результатам испытания кубов:

$$\bar{R} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{3} = \text{МПа.}$$

Призмennую прочность бетона и прочность бетона при осевом растяжении, отвечающие средней кубиковой проч-

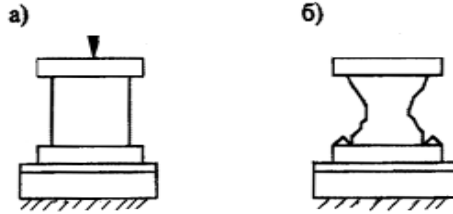


Рис. 1. Испытание стандартного бетонного куба на сжатие: *а* — схема испытания; *б* — форма разрушения образца

ности определим по эмпирическим зависимостям соответственно:

$$\bar{R}_b = (0,77 - 0,00125 \cdot \bar{R}) \cdot \bar{R} = \quad \text{МПа};$$

$$\bar{R}_{bt} = \frac{5 \cdot \bar{R}}{45 + \bar{R}} = \quad \text{МПа}.$$

Начальный модуль упругости бетона, отвечающий средней кубиковой прочности:

$$\bar{E}_b = \frac{55000 \cdot \bar{R}}{27 + \bar{R}} = \quad \text{МПа}.$$

### 1.1.2. Определение расчетных характеристик арматуры

Расчетные характеристики арматуры определяют на основе испытания образцов на разрывной машине по схеме, как это показано на рис. 2, *а*, *б*. По результатам замера усилий и деформаций арматуры строят график зависимости “ $\sigma$ – $\varepsilon$ ” (рис. 2, *в*), где  $\sigma = N/A_s$ ;  $\varepsilon = \Delta L/L$ ; здесь  $\Delta L$  — приращение длины, вследствие растяжения. В качестве опытной величины сопротивления растяжению стержней арматуры А-III принимается средняя величина (по результатам испытания трех образцов) физического предела текучести ( $\sigma_y$ ):

$$\bar{R}_s = \frac{(\sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3})}{3} = \quad \text{МПа}.$$

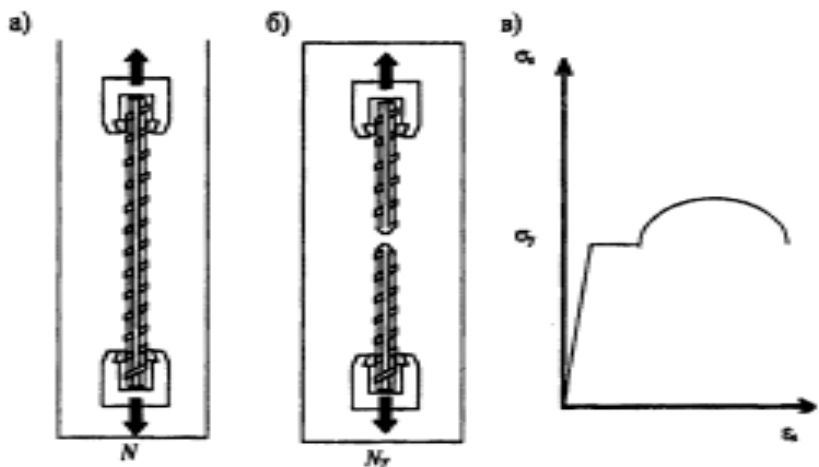


Рис. 2. Испытание арматуры на растяжение: *a* — расположение опытного образца в испытательном стенде; *б* — опытный образец после испытания; *в* — общий вид диаграммы растяжения арматуры класса А-III

## 1.2. Геометрические размеры и схема армирования балки

Геометрические размеры и схема армирования испытываемой балки показаны на рис. 3. Опытный образец армирован двумя плоскими каркасами с нижней продольной арматурой класса А-III. В средней части балки сжатая арматура не установлена. Для предотвращения преждевременного разрушения по наклонным сечениям предусмотрена поперечная арматура.

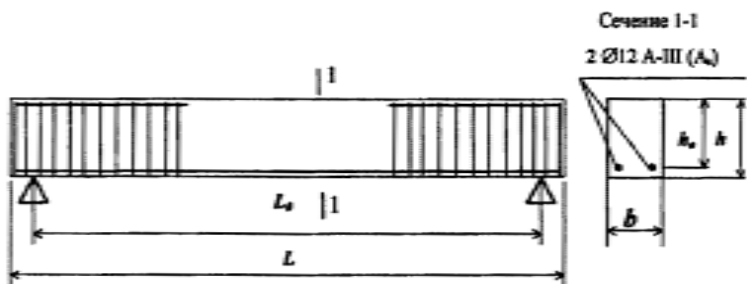


Рис. 3. Схема армирования балки

### 1.3. Определение характеристик приведенного сечения

Исходными данными для определения характеристик приведенного сечения, показанного на рис. 3 являются:

- высота сечения —  $h =$  мм;  
ширина сечения —  $b =$  мм;  
расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры  $A_s$  —  $a =$  мм;  
площадь поперечного сечения ненапрягаемой арматуры —  $A_s =$  мм<sup>2</sup>;  
модуль упругости бетона —  $E_b =$  МПа;  
модуль упругости ненапрягаемой арматуры —  $E_s =$  , МПа.  
Площадь приведенного сечения:

$$A_{red} = b \cdot h + \alpha_s \cdot A_s = \text{мм}^2,$$

где  $\alpha_s = E_s / E_b =$  .

Статический момент площади приведенного сечения относительно нижней грани:

$$S_{red} = b \cdot \frac{h^2}{2} + \alpha_s \cdot A_s \cdot a = \text{мм}^3.$$

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до нижней грани:

$$y_o = \frac{S_{red}}{A_{red}} = \text{мм}.$$

Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести сечения:

$$I_{red} = b \cdot \frac{h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left( y_o - \frac{h}{2} \right)^2 + \alpha_s \cdot A_s \cdot (y_o - a)^2 = \text{мм}^4.$$

Момент сопротивления приведенного сечения относительно нижней грани:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_o} = \text{мм}^3.$$

Упруго-пластический момент сопротивления относительно нижней грани сечения:

$$W_{p1} = 1,75 \cdot W_{red} = \quad \text{мм}^3.$$

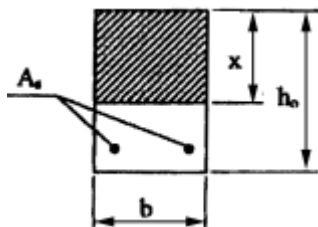
#### 1.4. Определение теоретического момента трещинообразования

Теоретический момент образования трещин:

$$= \quad \text{Н} \cdot \text{мм}.$$

#### 1.5. Определение теоретического разрушающего момента

В поперечном сечении балки действуют сжимающие усилия, которые воспринимаются бетоном и растягивающие, воспринимаемые нижней арматурой. Исходя из этого расчетная схема поперечного сечения будет иметь вид, как это показано на рис. 4.



Высота сжатой зоны в стадии разрушения:

$$x = \frac{\bar{R}_s \cdot A_s}{\bar{R}_b \cdot b} = \quad \text{мм}.$$

Теоретическое значение разрушающего момента:

$$M_{ul,cal} = \bar{R}_b \cdot b \cdot x \cdot \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) = \quad \text{Н} \cdot \text{мм}.$$

Рис. 4. Расчетная схема поперечного сечения балки

#### 1.6. Схема нагружения балки

Нагрузка на балку прикладывается в двух точках (в третях пролета) с помощью жесткой траверсы, как это показано на рис. 5. Вертикальные перемещения опор и в середине пролета измеряются с помощью индикаторов часового типа. Деформации сжатой и растянутой грани балки в зоне чистого изгиба измеряются с помощью механических тензометров.

Вес загрузочных устройств (траверсы и т.д.) —  $P = \quad \text{кН}$ .

Собственный вес балки —  $q = b \cdot h \cdot L = \quad \text{кН}$ .



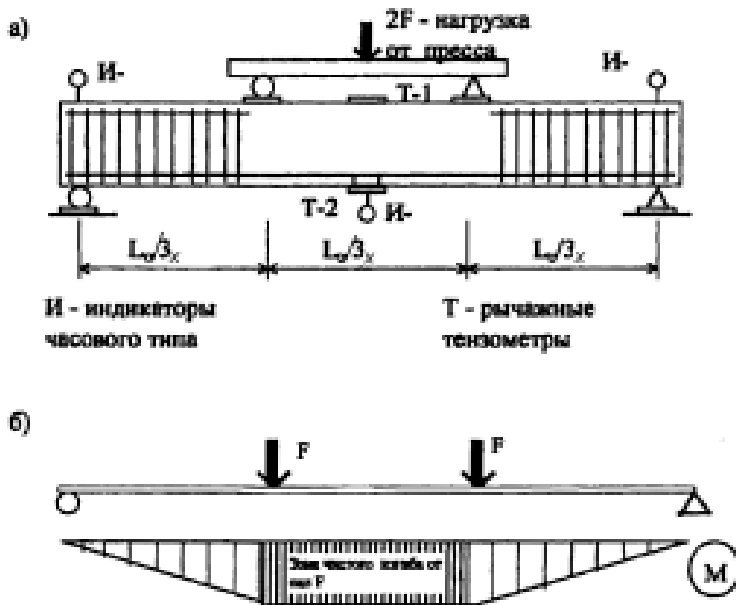


Рис.5. Схема загрузки балки и размещения измерительных приборов (а) и эпюра моментов от действия сил F (б)

Нагрузка, соответствующая теоретическому моменту трещинообразования:

$$F_{cr,cal} = 3 \cdot \frac{M_{cr,cal}}{L_0} - 3 \cdot q \cdot \frac{L_0}{8} - 0,5 \cdot P = \text{кН.}$$

Нагрузка, соответствующая теоретическому разрушающему моменту:

$$F_{ul,cal} = \frac{3 \cdot M_{ul,cal}}{L_0} - 3 \cdot q \cdot \frac{L_0}{8} - 0,5 \cdot P = \text{кН.}$$

### 1.7. Результаты испытания балки

Испытание балки производится в режиме анимации. Для увеличения нагрузки необходимо нажимать на клавишу “Enter”. При этом на дисплее будет демонстрироваться для

каждого этапа нагрузки: поведение балки под нагрузкой, эпюра деформаций соответственно по сжатой и растянутой зонам; эпюра нормальных напряжений в бетоне и арматуре; график развития изгибающего момента и прогиба в среднем сечении балки.

После того как достигнута разрушающая нагрузка необходимо построить график зависимости прогиба конструкции от изгибающего момента (рис. 6). На рисунке необходимо отметить теоретические и опытные значения момента, соответствующие трещинообразованию и разрушению, и зарисовать схему разрушения балки на рис. 7.

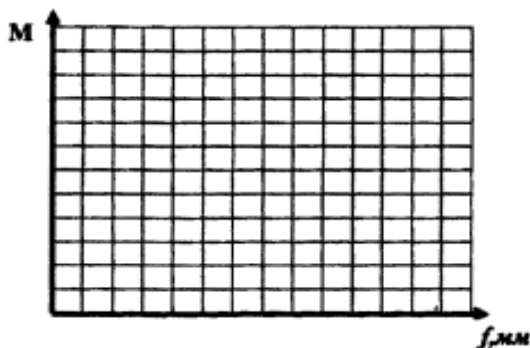


Рис. 6. График зависимости прогиба балки от изгибающего момента



Рис. 7. Карта трещин и схема разрушения

## 1.8. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений

Опытный момент трещинообразования:

$$M_{crc,exp} = \left( F_{crc,exp} + 0,5 \cdot P \right) \cdot \frac{L_o}{3} + q \cdot L_o \cdot \frac{L_o}{8} = \text{кНм.}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{(M_{crc,cal} - M_{crc,exp})}{M_{crc,cal}} \cdot 100 = \quad \%$$

Значение опытного разрушающего момента:

$$M_{ul,exp} = (F_{ul,exp} + 0,5 \cdot P) \cdot \frac{L_o}{3} + q \cdot L_o \cdot \frac{L_o}{8} = \quad \text{кНм.}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{(M_{ul,cal} - M_{ul,exp})}{M_{ul,cal}} \cdot 100 = \quad \%$$

## Работа № 2.

# ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО НАКЛОННЫМ СЕЧЕНИЯМ

**Цель работы** — изучение напряженно-деформированного состояния балки, разрушающейся по наклонному сечению.

### **Задачи работы:**

1. Определить прочность балки по наклонному сечению.
2. Провести наблюдение за характером образования и развития трещин на различных этапах загрузки вплоть до разрушения по наклонному сечению.
3. Проанализировать причины образования трещин и схемы разрушения балки.
4. На основе сравнения теоретической и опытной разрушающей нагрузки оценить качество конструкции.

## **2.1. Определение расчетных характеристик бетона и арматуры**

### **2.1.1. Определение характеристик бетона по результатам испытания кубов**

Для определения прочности бетона при сжатии испытывают образцы-кубы, принимая за эталон куб размером 15 см, изготовленный из того же замеса бетона, что и лабораторные конструкции. Для проведения лабораторных работ достаточно испытать три куба. Схема испытания показана на рис. 1.

Среднее значение кубиковой прочности бетона по результатам испытания кубов:

$$\bar{R} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{3} = \text{МПа.}$$

Призменная прочность бетона и прочность бетона при осевом растяжении, отвечающие средней кубиковой прочности определим по эмпирическим зависимостям соответственно:

$$\bar{R}_b = (0,77 - 0,00125 \cdot \bar{R}) \cdot \bar{R} = \text{МПа};$$

$$\bar{R}_{bt} = \frac{5 \cdot \bar{R}}{45 + \bar{R}} = \text{МПа}.$$

Начальный модуль упругости бетона, отвечающий средней кубиковой прочности:

$$\bar{E}_b = \frac{55000 \cdot \bar{R}}{27 + \bar{R}} = \text{МПа}.$$

### 2.1.2. Определение расчетных характеристик арматуры

Расчетные характеристики арматуры определяют на основе испытания образцов на разрывной машине по схеме, как это показано на рис. 8, а, б. По результатам замера усилий и деформаций арматуры строят график зависимости “ $\sigma$ – $\varepsilon$ ” (рис. 8, в), где  $\sigma = N/A_s$ ;  $\varepsilon = \Delta L/L$ ; здесь  $\Delta L$  — приращение длины, вследствие растяжения. Опытная величина сопротивления растяжению проволочной арматуры Вр-I принимается как средняя величина (по результатам испытания трех образцов) условного предела текучести ( $\sigma_y$ ):

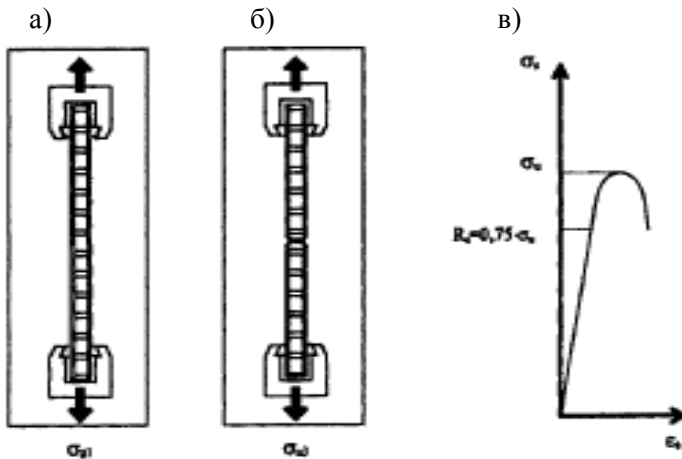


Рис. 8. Испытание арматуры на растяжение: а — расположение опытного образца в испытательном стенде; б — опытный образец после испытания; в — общий вид диаграммы растяжения арматуры класса Вр-I

$$\bar{R}_s = \frac{0,75(\sigma_{u1} + \sigma_{u2} + \sigma_{u3})}{3} = \text{МПа.}$$

Распределение напряжений растяжения в хомутах по длине наклонной трещины происходит неравномерно, как это видно из рис. 9. Максимальное значение напряжения у хомутов, ближе к пересечению наклонной трещиной нижней растянутой зоны и минимальные у вершины наклонной трещины, длина проекции которой принимается равной  $C_0$ . Для учета неравномерности в распределении напряжений, за сопротивление растяжению поперечной арматуры, принимаем величину условного предела текучести, умноженную на коэффициент условия работы  $\gamma_{s1}$ :

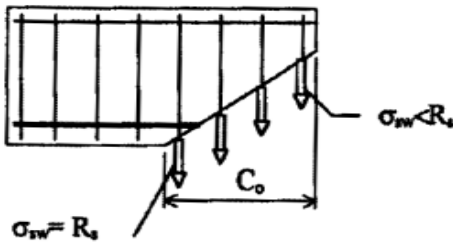


Рис. 9. Схема наклонного сечения балки

## 2.2. Геометрические размеры и схема армирования балки

Геометрические размеры и схема армирования испытуемой балки показаны на рис. 10. Опытный образец арми-

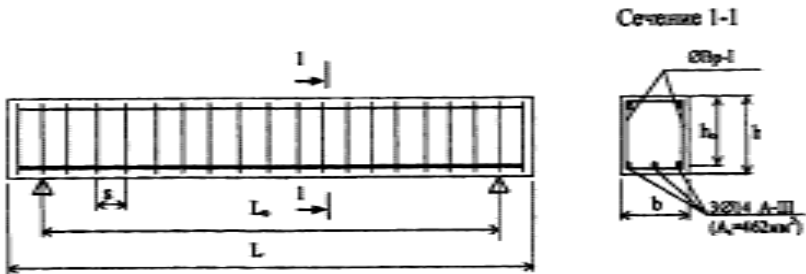


Рис. 10. Геометрические размеры и схема армирования балки

рован двумя плоскими каркасами с нижней продольной арматурой класса А-III и поперечной арматурой класса Вр-I, с площадью сечения одного стержня  $A_{sw,i} = \text{мм}^2$ . Плоские каркасы объединены в пространственный с помощью хомутов. Поперечная арматура располагается с шагом  $S = \text{мм}$  равномерно по всей длине балки. Для предотвращения преждевременного разрушения по нормальным сечениям предусмотрена дополнительная продольная арматура.

### 2.3. Схема нагружения балки

Нагрузка на балку прикладывается в двух точках (в четвертях пролета) с помощью жесткой траверсы, как это показано на рис. 11. Деформации растяжения и сжатия в наклонном сечении измеряются с помощью рычажных тензометров. Вес загрузочных устройств (траверсы и т.д.) —  $P = \text{кН}$ ,

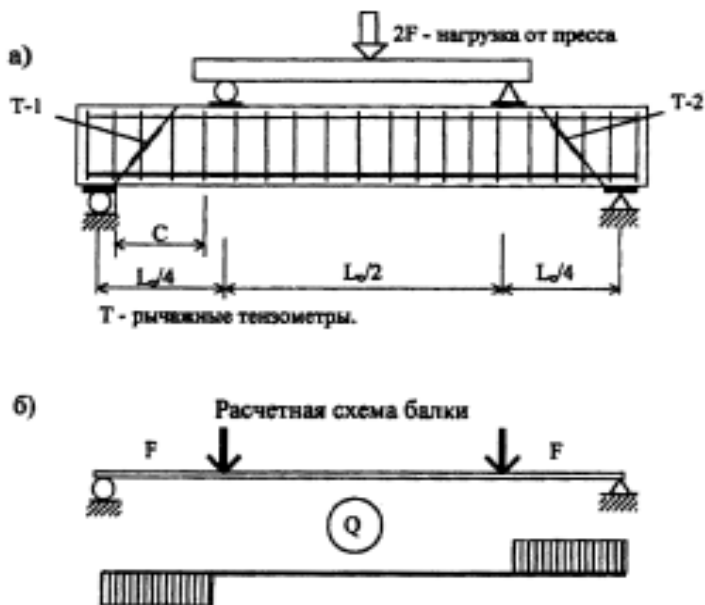


Рис. 11. Схема нагружения балки с расположением измерительных приборов (а) и ее расчетная схема с эпюрой поперечных сил (б)

собственный вес балки:  $q = 6 \cdot h \cdot 25 =$

кН/п.м.

## 2.4. Определение теоретической разрушающей поперечной силы

Исходные данные:

рабочая высота сечения —  $h_o =$  мм;

ширина поперечного сечения —  $b =$  мм;

шаг хомутов —  $s =$  мм;

расстояние от опоры до ближайшей сосредоточенной силы —

$C =$  мм;

число срезов хомута в сечении балки —  $n = 2$ ;

$\varphi_{b2} = 2$  — для тяжелого бетона.

Погонное усилие в поперечных стержнях:

$$q_{sw} = \frac{\bar{R}_{sw} \cdot A_{sw,t} \cdot n}{S} = \text{Н/мм.}$$

Длина проекции наклонной трещины на продольную ось элемента:

$$C_o = \sqrt{\varphi_{b2} \cdot \bar{R}_{bt} \cdot \frac{h_o^2}{q_{sw}}} = \text{мм.}$$

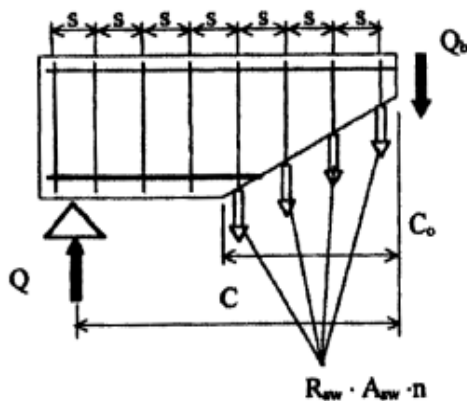


Рис. 12. Схема усилий при расчете прочности изгибаемого элемента по наклонным сечениям



Значение  $C_o$  должно удовлетворять конструктивным требованиям:

$$h_o \leq C_o \leq 2h_o \text{ и } C_o \leq C.$$

Назначьте  $C_o$  в соответствии с этими требованиями

$$C_o =$$

мм.

Разрушающая поперечная сила из условия расчета на действие поперечной силы:

$$Q_{ul,cal} = \varphi_{b2} \cdot \bar{R}_{bt} \cdot b \cdot \frac{h_o}{C} + q_{sw} \cdot C_o = \quad \text{Н.}$$

## 2.5. Результаты испытания балки

Испытание балки производится в режиме анимации. Для увеличения нагрузки необходимо нажимать на клавишу “Enter”. При этом на дисплее для каждого этапа нагрузки будет демонстрироваться: поведение конструкции под нагрузкой; график роста деформаций соответственно по сжатой и растянутой зонам.

После того как достигнута разрушающая нагрузка необходимо зарисовать схему разрушения балки на рис. 13.



Рис. 13. Карта трещин и схема разрушения

## 2.6. Сопоставление теоретических экспериментальных значений

Экспериментальная разрушающая поперечная сила:

$$Q_{ul,exp} = F_{ul,exp} + \frac{q \cdot L_o}{4} + 0,5 \cdot P = \quad \text{кН.}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{(Q_{ul,cal} - Q_{ul,exp})}{Q_{ul,cal}} \cdot 100\% = \quad \%$$

## Работа № 3

# ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ ВНЕЦЕНТРЕННОМ СЖАТИИ

**Цель работы** — исследование напряженно-деформированного состояния внецентренно-сжатого элемента при большом эксцентриситете приложения продольной силы.

### **Задачи работы:**

1. Определить расчетную величину разрушающей нагрузки.
2. Провести наблюдение за характером образования и развития трещин, а также картиной разрушения при внецентренном сжатии.
3. Проанализировать причины образования трещин и разрушения колонны.
4. На основе сравнения теоретической и опытной разрушающих нагрузок оценить качество конструкции.

## **3.1. Определение расчетных характеристик бетона и арматуры**

### **3.1.1. Определение характеристик бетона по результатам испытания кубов**

Для определения прочности бетона при сжатии испытывают образцы-кубы, принимая за эталон куб размером 15 см, изготовленный из того же замеса бетона, что и лабораторные конструкции. Для проведения лабораторных работ достаточно испытать три куба. Схема испытания показана на рис. 1.

Среднее значение кубиковой прочности бетона по результатам испытания кубов:

$$\bar{R} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{3} = \text{МПа.}$$

Призмennую прочность бетона и прочность бетона при осевом растяжении, отвечающие средней кубиковой прочности определим по эмпирическим зависимостям соответственно:

$$\bar{R}_b = (0,77 - 0,00125 \cdot \bar{R}) \cdot \bar{R} = \text{МПа};$$

$$\bar{R}_{bt} = \frac{5 \cdot \bar{R}}{45 + \bar{R}} = \text{МПа}.$$

Начальный модуль упругости бетона, отвечающий средней кубиковой прочности:

$$\bar{E}_b = \frac{55000 \cdot \bar{R}}{27 + \bar{R}} = \text{МПа}.$$

Определение характеристики сжатой зоны бетона:

$$\omega = 0,85 - 0,008 \cdot \bar{R}_b =$$

Определение граничного значения относительной высоты сжатой зоны бетона:

$$\zeta = \frac{\omega}{R} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\omega}{400}} \cdot \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right) =$$

### 3.1.2. Определение расчетных характеристик арматуры

Расчетные характеристики арматуры определяют на основе испытания образцов на разрывной машине по схеме, как это показано на рис. 2, а, б. По результатам замера усилий и деформаций арматуры строят график зависимости “σ-ε” (рис. 2, в), где  $\sigma = N/A_s$ ;  $\epsilon = \Delta L/L$ ; здесь  $\Delta L$  — приращение длины, вследствие растяжения.

В растянутой зоне устанавливается стержневая арматура класса А-III с физическим пределом текучести ( $\sigma_y$ ):

$$\bar{R}_s = \frac{0,75(\sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3})}{3} = \text{МПа}.$$

В сжатой зоне устанавливается гладкая стержневая арматура класса А-I с физическим пределом текучести ( $\sigma_y$ ). Поскольку арматура А-I работает одинаково на растяжение и сжатие, в качестве расчетного сопротивления сжатию принимаем среднее значение физического предела текучести:

$$\bar{R}_{sc} = \frac{0,75(\sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3})}{3} = \text{МПа}.$$

### 3.2. Геометрические размеры и схема армирования колонны

Геометрические размеры и схема армирования испытуемой колонны показаны на рис. 14. Опытный образец изготавливается в виде двухконсольной колонны с целью обеспечения приложения нагрузки с большим эксцентриситетом. Колонна армирована двумя плоскими каркасами с растянутой продольной арматурой класса А-III с площадью сечения одного стержня  $A_{s,i} =$  мм<sup>2</sup> и сжатой арматурой класса А-I с площадью сечения одного стержня  $A_{sc,i} =$  мм<sup>2</sup>. Плоские каркасы объединены в пространственный с помощью хомутов.

### 3.3. Схема нагружения колонны

Нагрузка на колонну прикладывается по торцам с эксцентриситетом, относительно центра тяжести растянутой арматуры “e”, как это показано на рис. 15.

Деформации растяжения и сжатия в сечении колонны измеряются с помощью рычажных тензометров.

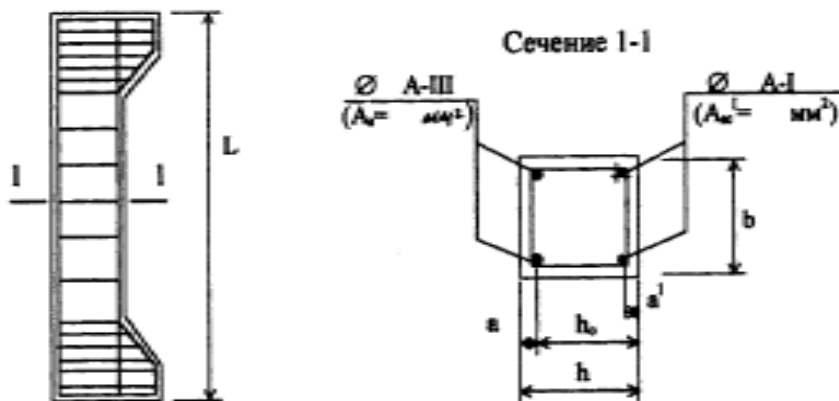


Рис. 14. Геометрические размеры и схема армирования колонны

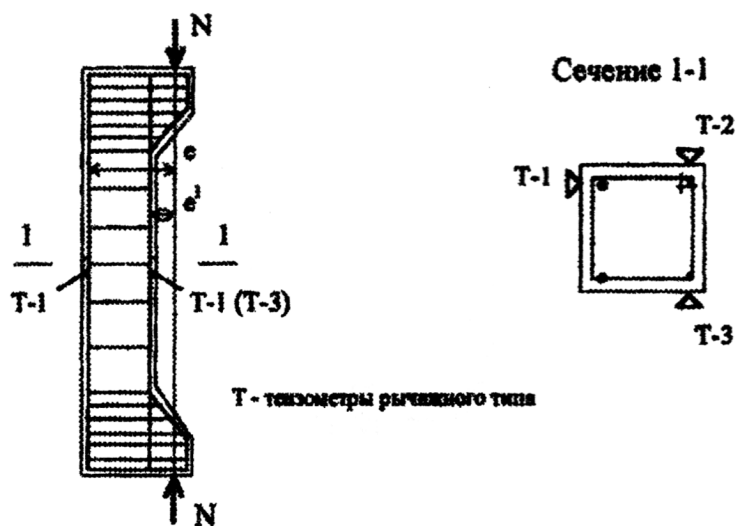


Рис. 15. Схема приложения нагрузки и размещения измерительных приборов

### 3.4. Определение теоретической продольной разрушающей силы

Исходные данные:

ширина сечения —  $b =$  мм;

рабочая высота сечения —  $h_0 =$  мм;

эксцентриситет продольного усилия относительно центра тяжести арматуры  $A_s$  —  $e =$  мм;

эксцентриситет продольного усилия относительно центра тяжести арматуры  $A_s^l$  —  $e^l =$  мм;

граничная высота сжатой зоны —  $x_r = \xi \cdot h_0 =$  мм.

Высота сжатой зоны, в соответствии с расчетной схемой сечения, показанной на рис. 16, вычисляется из условия равенства нулю суммы моментов всех сил относительно оси действия продольной силы:

$$x = (h_0 - e) + \sqrt{(e - h_0)^2 + \frac{2 \cdot (\bar{R}_s \cdot A_s \cdot e - \bar{R}_{sc} \cdot A_s^l \cdot e^l)}{\bar{R}_b \cdot b}} = \text{мм.}$$

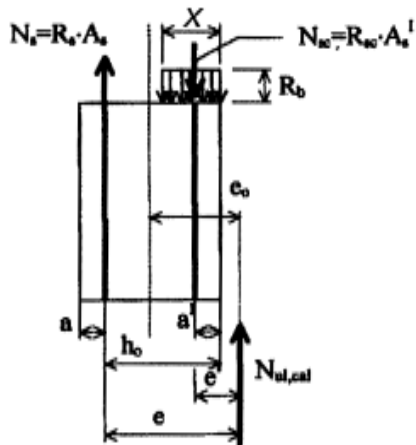


Рис. 16. Расчетная схема сечения при расчете на внецентренное сжатие

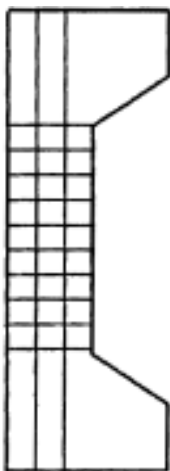


Рис. 17. Карта трещин и схема разрушения

Так как  $x < x_r$ , имеем случай внецентренного сжатия с большим эксцентриситетом.

Теоретическое значение продольной разрушающей силы вычисляется из условия равенства 0 сумм проекций всех сил на продольную ось:

$$N_{ul,cal} = \bar{R}_b \cdot b \cdot x + \bar{R}_{sc} A_s^I - \bar{R}_s \cdot A_s = \text{кН.}$$

### 3.5. Результаты испытания колонны

Испытание колонны производится в режиме анимации. Для увеличения нагрузки необходимо нажимать на клавишу "Enter". При этом на дисплее демонстрируется: поведение конструкции под нагрузкой; эпюра деформаций соответственно по сжатой и растянутой зонам; эпюра нормальных напряжений в бетоне

и арматуре; график развития деформаций сжатия и растяжения по данным измерения рычажных тензометров.

После того как достигнута разрушающая нагрузка необходимо зарисовать схему разрушения колонны на рис. 17.

### 3.6. Сопоставление результатов опыта и расчетов

Теоретическая разрушающая продольная сила —  $N_{ul,cal} =$  кН.

Экспериментальная разрушающая продольная сила —  $N_{ul,exp} =$  кН.

Величина отклонения в %:

$$\frac{(N_{ul,cal} - N_{ul,exp})}{N_{ul,cal}} \cdot 100\% = \quad \%$$

## Работа № 4

# ИСПЫТАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ

**Цель работы** — изучение напряженно-деформированного состояния предварительно напряженного изгибаемого элемента.

### **Задачи работы:**

1. Оценить трещиностойкость балки с учетом потерь предварительного напряжения в рабочей арматуре и определить ее несущую способность и прогиб на стадии до образования трещин.

2. Провести наблюдение за характером образования и развития трещин на различных этапах загрузки вплоть до разрушения по нормальному сечению.

3. Проанализировать причины образования трещин и разрушения балки.

4. Ознакомиться с характером прогиба балки под нагрузкой и построить график зависимости “нагрузка-деформация” по опытным данным.

5. На основе сравнения теоретических и опытных значений момента трещинообразования, разрушающей нагрузки и предельного прогиба оценить качество конструкции.

### **4.1. Определение расчетных характеристик бетона и арматуры**

#### **4.1.1. Определение характеристик бетона на момент отпуска натяжения по результатам испытания кубов**

Для определения прочности бетона при сжатии испытывают образцы-кубы, принимая за эталон куб размером 15 см, изготовленный из того же замеса бетона, что и лабораторные конструкции. Для проведения лабораторных работ достаточно испытать три куба. Схема испытания показана на рис. 1.

Среднее значение кубиковой прочности бетона по результатам испытания кубов:

$$\bar{R} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{3} = \text{МПа.}$$



Призменная прочность бетона и прочность бетона при осевом растяжении, отвечающие средней кубиковой прочности определим по эмпирическим зависимостям соответственно:

$$\bar{R}_b = (0,77 - 0,00125 \cdot \bar{R}) \cdot \bar{R} = \text{МПа};$$

$$\bar{R}_{bt} = \frac{5 \cdot \bar{R}}{45 + \bar{R}} = \text{МПа}.$$

Начальный модуль упругости бетона, отвечающий средней кубиковой прочности:

$$\bar{E}_b = \frac{55000 \cdot \bar{R}}{27 + \bar{R}} = \text{МПа}.$$

#### 4.1.2. Определение расчетных характеристик арматуры

Расчетные характеристики арматуры определяют на основе испытания образцов на разрывной машине по схеме, как это показано на рис. 18, а, б. По результатам замера усилий и деформаций арматуры строят график зависимости “ $\sigma$ – $\varepsilon$ ” (рис. 18, в), где  $\sigma = N/A_s$ ;  $\varepsilon = \Delta L/L$ ; здесь  $\Delta L$  — приращение длины, вследствие растяжения. Опытная величина сопротивления растяжению стержневой арматуры А-V принимается как средняя величина (по результатам испытания трех образцов) условного предела текучести ( $\sigma_u$ ):

$$\bar{R}_s = \frac{0,75(\sigma_{u1} + \sigma_{u2} + \sigma_{u3})}{3} = \text{МПа}.$$

### 4.2. Геометрические размеры и схема армирования железобетонной балки

Геометрические размеры и схема армирования испытываемой балки показаны на рис. 19. Опытный образец армирован двумя плоскими каркасами и предварительно напрягаемой стержневой арматурой класса А-V. Предварительное напряжение создается электротермическим способом с натяжением на упоры. В средней части балки сжатая арматура не установлена. Для предотвращения преждевременного разрушения по наклонным сечениям предусмотрена поперечная арматура.

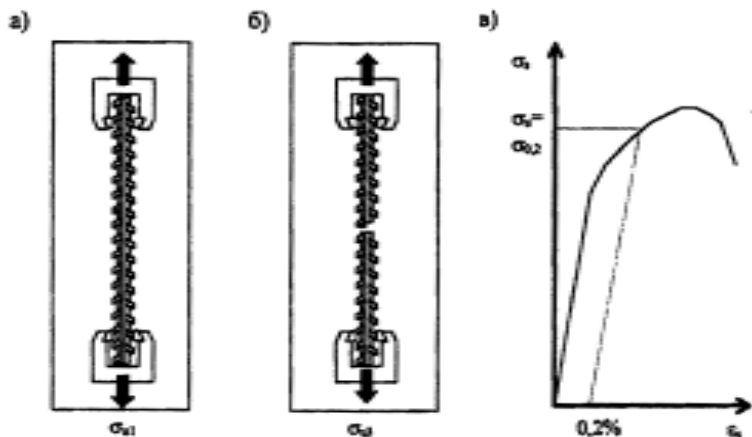


Рис. 18. Испытание арматуры на растяжение: *a* — расположение опытного образца в испытательном стенде; *б* — опытный образец после испытания; *в* — общий вид диаграммы растяжения арматуры класса А-V

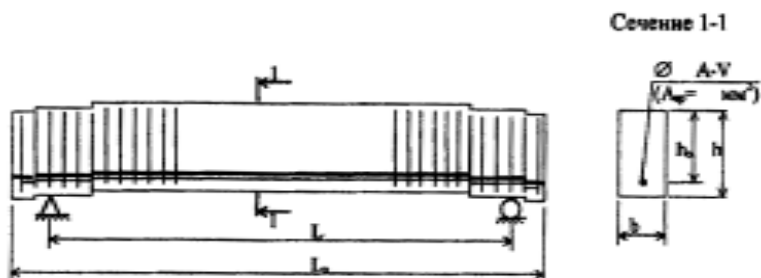


Рис. 19. Геометрические размеры и схема армирования ж/б испытываемой балки

### 4.3. Определение характеристик приведенного сечения

Исходные данные:

высота сечения —  $h =$  мм;

ширина сечения —  $b =$  мм;

расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры

$A_{sp} - a_p =$  мм;

площадь поперечного сечения напрягаемой арматуры —  $A_{sp} =$  мм<sup>2</sup>;  
 модуль упругости напрягаемой арматуры —  $E_{sp} =$  МПа.  
 Соотношение модулей упругости арматуры и бетона:

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_b} =$$

Площадь приведенного сечения:

$$A_{red} = b \cdot h + d_{sp} \cdot A_{sp} = \text{мм}^2.$$

Статический момент площади приведенного сечения относительно растянутой грани

$$S_{red} = b \cdot \frac{h^2}{2} + d_{sp} \cdot A_{sp} \cdot a_p = \text{мм}^3.$$

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани:

$$y_o = \frac{S_{red}}{A_{red}} = \text{мм}.$$

Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести:

$$I_{red} = b \cdot \frac{h^3}{12} + b \cdot h \cdot \left( y_o - \frac{h}{2} \right)^2 + d_{sp} \cdot A_{sp} \cdot (y_o - a_p)^2 = \text{мм}^4.$$

Момент сопротивления приведенного сечения относительно нижней грани:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_o} = \text{мм}^3.$$

Уруго пластический момент сопротивления относительно нижней грани:

$$W_{pl} = 1,75 \cdot W_{red} = \text{мм}^3.$$

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядровой точки:

$$r = \varphi \cdot \frac{W_{pl}}{A_{red}} = \text{мм}.$$

#### 4.4. Определение потерь предварительного напряжения

Первые потери:

потери от релаксации напряжений:  $\sigma_l = 0,03 \cdot \sigma_{sp} =$  МПа,

где  $\sigma_{sp} =$  МПа — начальное предварительное напряжение.

Усилие предварительного обжатия с учетом первых потерь  $\sigma_l$ :

$$P_1 = A_{sp} \cdot (\sigma_{sp} - \sigma_l) = \text{Н.}$$

Напряжение в бетоне на уровне центра тяжести арматуры  $A_{sp}$ :

$$\sigma_{sp} = \frac{P_1}{A_{red}} + P_1 \cdot \frac{y_o - a_p}{I_{red}} = \text{МПа.}$$

Потери от быстро натекающей ползучести:

$$\sigma_b = 40 \cdot \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} = \text{МПа.}$$

Вторые потери:

потери от усадки бетона —  $\sigma_8 = 50$  МПа;

потери от ползучести —  $\sigma_9 = 150 \cdot \frac{\sigma_{bp}}{R_{bp}} =$  МПа.

Полные потери:  $\sigma_{los} = \sigma_l + \sigma_b + \sigma_8 + \sigma_9 =$  МПа.

Усилие предварительного обжатия с учетом всех потерь:

$$P_2 = A_{sp} \cdot (\sigma_{sp} - \sigma_{los}) = \text{Н.}$$

#### 4.5. Определение теоретического момента трещинообразования

Эксцентриситет усилия предварительного обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения:

$$lop = y_o - a_p = \text{мм.}$$

Изгибающий момент усилия предварительного обжатия относительно оси, проходящей через верхнюю ядровую точку:

$$M_{rp} = P_2 \cdot (lop + r) = \text{Н} \cdot \text{мм.}$$

Теоретический момент образования трещин:

$$M_{crc} = \bar{R}_{bt} \cdot W_{pt} + M_{rp} = \quad \text{Н}\cdot\text{мм.}$$

#### 4.6. Определение теоретического разрушающего момента

Граничное значение относительной высоты сжатой зоны при  $\sigma_{SR} = R_s + 400 - \sigma_{SR} =$  МПа:

$$\xi_R = \frac{\omega}{\sqrt{400 + \frac{\sigma_{SR}}{\sigma_{SC,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)}} =$$

Высота сжатой зоны в стадии разрушения без учета коэффициента  $\gamma_{b6}$ :

$$x = \bar{R}_{sp} \cdot \frac{A_{sp}}{\bar{R}_b \cdot b} = \quad \text{мм.}$$

Относительная высота сжатой зоны:

$$\xi = \frac{x}{h_0} = \quad .$$

Коэффициент условий работы для высокопрочной арматуры:

$$\gamma_{b6} = 1,15 - (1,15 - 1) \cdot \left(\frac{\xi}{\xi_R - 1}\right) = < 1,15.$$

Высота сжатой зоны в стадии разрушения с учетом коэффициента  $\gamma_{s6}$ :

$$x = \gamma_{s6} \cdot \bar{R}_{sp} \cdot \frac{A_{sp}}{\bar{R}_b \cdot b} = \quad \text{мм.}$$

Теоретическое значение разрушающего момента:

$$M_{ub} = \bar{R}_b \cdot b \cdot x \cdot \left(h_0 - \frac{x}{2}\right) = \quad \text{Н}\cdot\text{мм.}$$

#### 4.7. Определение теоретического перемещения середины пролета

Кривизна продольной оси балки, обусловленная перемещением от внешней нагрузки, отвечающей уровню загрузки, при котором отсутствуют трещины, т.е.  $0,8 \cdot M_{cr}$ :

$$\frac{1}{r} = \frac{0,8 \cdot M_{cr,cal}}{0,85 \cdot E_b \cdot I_{red}} = \quad 1/\text{мм.}$$

Теоретическое перемещение от внешней нагрузки:

$$f_{cal} = \frac{23}{216} \cdot \frac{1}{r} \cdot L_o^2 = \quad \text{мм.}$$

#### 4.8. Схема нагружения балки

Нагрузка на балку прикладывается в двух точках (в третях пролета) с помощью жесткой траверсы, как это показано на рис. 20, а. Вертикальные перемещения опор и в середине пролета измеряются с помощью индикаторов часового типа. Деформации сжатой и растянутой грани балки в зоне чистого изгиба (рис. 20, б) измеряются с помощью механических тензометров.

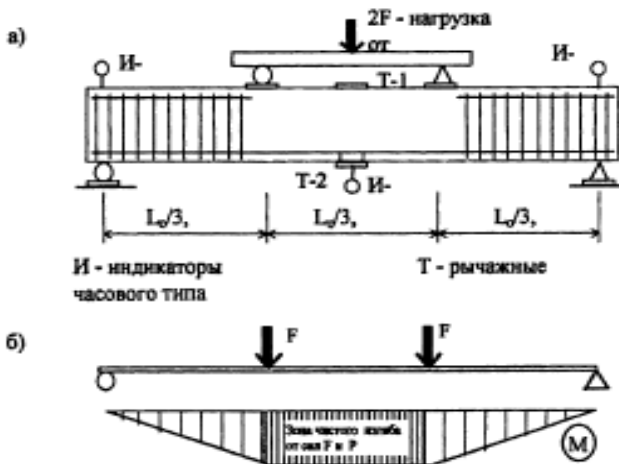


Рис. 20. Схема загрузки балки и размещения измерительных приборов (а) и эпюра изгибающих моментов (б)

Вес загрузочных устройств (траверсы и т.д.) —  $P =$  кН.

Собственный вес балки —  $q = b \cdot h \cdot 25 =$  кН.

Нагрузка, соответствующая теоретическому моменту трещино-образования:

$$F_{cr,cal} = 3 \cdot \frac{M_{cr,cal}}{L_o} - 3 \cdot q \cdot \frac{L_o}{8} - 0,5 \cdot P = \text{кН.}$$

Нагрузка, соответствующая теоретическому разрушающему моменту:

$$F_{ul,cal} = \frac{3 \cdot M_{ul,cal}}{L_o} - 3 \cdot q \cdot \frac{L_o}{8} - 0,5 \cdot P = \text{кН.}$$

#### 4.9. Результаты испытания балки

Испытание балки производится в режиме анимации. Для увеличения нагрузки необходимо нажимать на клавишу “Enter”. При этом на дисплее будет демонстрироваться для каждого этапа нагрузки: поведение балки под нагрузкой, эпюра деформаций соответственно по сжатой и растянутой зонам; эпюра нормальных напряжений в бетоне и арматуре; график развития изгибающего момента и прогиба в среднем сечении балки.

После того как достигнута разрушающая нагрузка необходимо построить график зависимости момента от прогиба конструкции на рис. 21, на котором необходимо отметить теоретические и опытные значения моментов соответствующих трещинообразованию и разрушению, и зарисовать схему разрушения балки на рис. 22.

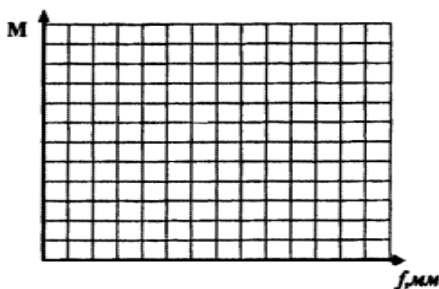


Рис. 21. График зависимости прогиба балки от изгибающего момента

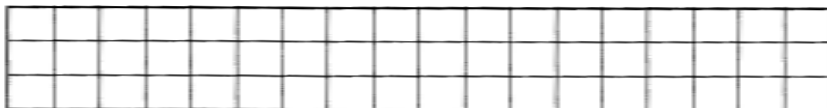


Рис. 22. Карта трещин и схема разрушения

#### 4.10. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений

Опытный момент трещинообразования:

$$M_{cr,exp} = (F_{cr,exp} + 0,5 \cdot P) \cdot \frac{L_o}{3} + g \cdot L_o \cdot \frac{L}{8} = \text{кН} \cdot \text{м.}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{(M_{cr,cal} - M_{cr,exp})}{M_{cr,cal}} \cdot 100\% = \text{\%}$$

Опытный разрушающий момент:

$$M_{ul,exp} = (F_{ul,exp} + 0,5 \cdot P) \cdot \frac{L_o}{3} + g \cdot L_o \cdot \frac{L_o}{8} = \text{кН} \cdot \text{м.}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{(M_{ul,cal} - M_{ul,exp})}{M_{ul,cal}} \cdot 100\% = \text{\%}$$

Теоретическое перемещение —  $f_{cal} =$  мм.

Экспериментальное перемещение —  $f_{exp} =$  мм.

Величина отклонения:

$$\frac{(f_{cal} - f_{exp})}{f_{cal}} \cdot 100\% = \text{\%}$$



## ЛИТЕРАТУРА

### *Основная*

1. С а з ы к и н И.А. Строительные конструкции: Уч. пос. Ч. 1: Железобетонные конструкции. — М.: МИИТ, 2009. — 65 с.

### *Дополнительная*

2. Т р е к и н Н.Н., К у л а к о в а Н.А. Железобетонные каменные конструкции: Уч. пос. — М.: РГОТУПС, 2004. — 83 с.

3. С а з ы к и н И.А. Архитектура и строительные конструкции: Уч. пос. Ч. 1: Железобетонные конструкции. — М.: РГОТУПС, 2003. — 66 с.

4. Проектирование железобетонных, каменных и армокаменных конструкций: Уч. пос. / А.К. Фролов и др. — М.: АСВ, 2002. — 170 с.

# ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ И КАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ на ЭВМ

Компьютерная верстка *Н.Ф. Цыганова*

---

Тип. зак.

Подписано в печать 30.03.12 Гарнитура Times

Усл. печ. л. 2,25

Тираж 200 экз.

Ризография

Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>

---

Редакционный отдел  
Информационно-методического управления РОАТ,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати  
Информационно-методического управления РОАТ,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2