

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич
Должность: ректор
Дата подписания: 17.12.2021 11:24:39
Уникальный программный ключ:
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра уникальных зданий и сооружений

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О. П. Лектионова
« 15 » _____ 2017 г.



ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине
«Железобетонные и каменные конструкции (общий курс)»
для студентов специальности 08.05.01
Строительство уникальных зданий и сооружений

Курск 2017

УДК 624.012

Составитель: М.С. Губанова

Рецензент

Доктор технических наук, профессор *В.И. Колчунов*

Железобетонные конструкции: методические указания к лабораторным занятиям по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции (общий курс)» для студентов специальности 08.05.01 Строительство уникальных зданий и сооружений / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: М.С. Губанова. Курск, 2017. - 52 с.: ил.15, табл. 4, прилож.1. Библиогр.: 50 с.

В настоящих методических указаниях содержатся указания по выполнению лабораторных работ, направленных на изучение прочностных свойств железобетонных конструкций.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Железобетонные и каменные конструкции (общий курс)» студентами специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений».

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 15.12.2017. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд.л. 2,74. Тираж 100 экз. Заказ. 36 26. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50лет Октября, 94.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа № 1 Определение прочности бетонов на сжатие	5
Лабораторная работа № 2 Определение физико-механических характеристик стальной арматуры	9
Лабораторная работа № 3 Испытание железобетонной балки с разрушением по нормальному сечению	12
Лабораторная работа № 4 Испытание железобетонной балки на изгиб с разрушением по наклонному сечению	255
Лабораторная работа № 5 Испытание железобетонной колонны на внецентренное сжатие с большим эксцентриситетом	333
Лабораторная работа № 6 Исследование трещиностойкости и деформаций железобетонной предварительно напряженной балки в процессе нагружения	40
Список литературы	50
Приложение	51

ВВЕДЕНИЕ

При изучении студентами раздела «Железобетонные конструкции» в составе комплексной дисциплины «Конструкции городских сооружений и зданий» предусмотрен ряд лабораторных работ, направленных на углубленное изучение и понимание физических основ и предпосылок, заложенных в основу теории расчета железобетонных сооружений и внесенных в нормативные документы.

В соответствии с учебным планом выполняются 6 лабораторных работ, посвященных испытанию железобетонных элементов при различных видах напряженного состояния. При выполнении лабораторных работ студенты углубленно изучают поведение железобетонных конструкций на различных стадиях загрузки и получают уверенность в надежности используемых в России методов расчета конструкций. Кроме того, будущие инженеры-строители знакомятся с методикой проведения испытаний конструкций, устройствами и приборами, используемыми при испытании, с методами определения прочностных характеристик конструкционных материалов.

Методические указания содержат сведения о характере работы сжатых и изгибаемых железобетонных элементов при нагружении вплоть до разрушения, основные положения по их расчету, данные о материалах, конструкциях экспериментальных образцов, приборах, оборудовании и схемах нагружения, а также рекомендации по обработке экспериментальных данных и составлению обоснованных выводов о результатах испытаний.

Результаты испытаний и теоретических расчетов оформляются в виде отчетов, в которых анализируются полученные результаты, приводится сравнение опытных и теоретических значений исследуемых параметров, дается пояснение о причинах отклонений в этих величинах. Расчет испытанных конструкций выполняется студентами «вручную» и с использованием персональных компьютеров по программам, имеющимся на кафедре.

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

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ НА СЖАТИЕ

1.1 Цель работы

1. Определить кубиковую прочность бетона на сжатие путем испытаний образцов.
2. Косвенным методом, по значению кубиковой прочности бетона, определить призмennую прочность бетона.

1.2 Изготовление образцов для испытаний

Физико-механические характеристики бетона определяются при испытании образцов, изготовленных и выдержанных в соответствии с ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». За базовый размер принят образец с размерами рабочего сечения 150x150 мм.

В зависимости от задач испытаний бетонные образцы могут изготавливаться и храниться в стандартных условиях или в условиях, аналогичных тем, в которых изготавливаются и выдерживаются конструкции.

Образцы изготовляют сериями в формах по ГОСТ 22685-77 «Формы для изготовления контрольных образцов бетона. Технические условия». Для стандартных производственных испытаний серия должна состоять не менее чем из трех образцов.

Перед испытанием образцы должны в течение 2...4 часов находиться в помещении лаборатории при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха не менее 55 %. На образцах выбирают и отмечают грани, к которым будут приложены усилия при испытании, при этом слои укладки бетона должны быть параллельны усилиям (исключение составляют предназначенные для раскалывания образцы, у которых слои должны быть перпендикулярны действующим усилиям).

Измерения линейных размеров образцов производят с точностью $\pm 1\%$. Каждый линейный размер образца-куба вычисляют как среднее арифметическое значение результатов двух измерений по серединам

двух противоположных граней. Результаты измерений линейных размеров и обнаруженные дефекты записывают в журнал испытаний.

1.3 Испытание образцов

Испытание образцов производится на испытательных машинах или прессах, аттестованных организациями Госстандарта или ведомственными метрологическими службами. Тип (марку) испытательной машины (пресса, установки) и выбранную шкалу силоизмерителя записывают в журнале испытаний.

1.4 Определение прочности

Подготовленные к испытанию образцы-кубы устанавливаются одной из заранее выбранных граней на нижнюю опорную плиту прессы таким образом, чтобы смещение центра образца относительно центра плиты не превышало 1% длины ребра куба (рисунок 1.1).

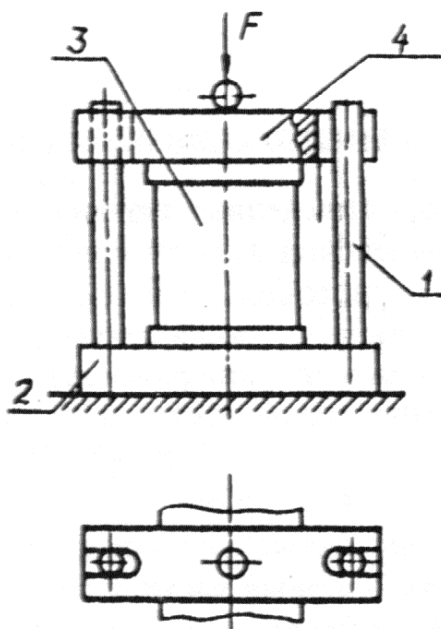


Рисунок 1.1 – Схема для проведения испытаний образцов-кубов на осевое сжатие (определение кубиковой прочности):

1 – направляющие; 2 – нижнее нагрузочное устройство;
3 – образец; 4 – верхнее нагрузочное устройство

Напряжение в образцах при нагружении должно возрастать непрерывно с постоянной скоростью (0,6-0,4 МПа/с) до его разрушения (рисунок 1.2).

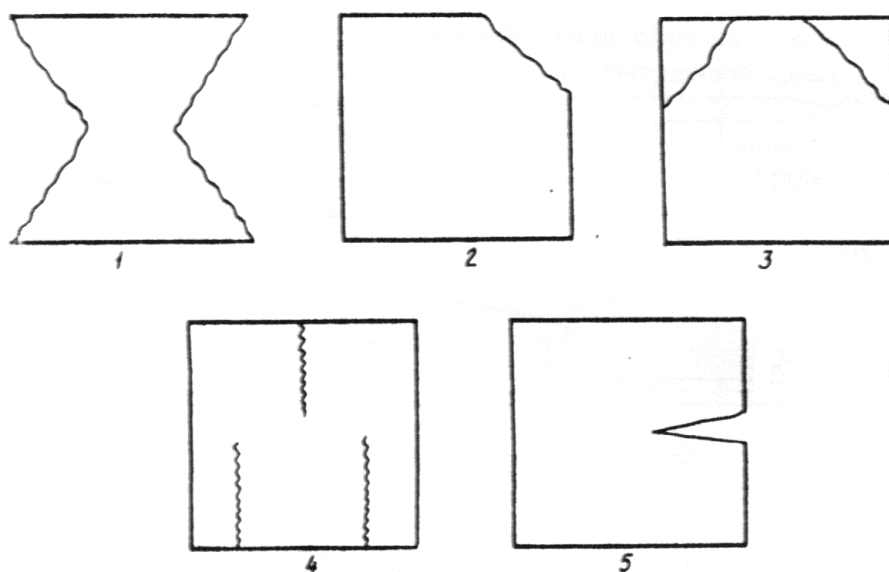


Рисунок 1.2 – Характер разрушений при проведении испытаний образцов-кубов на осевое сжатие:

1 – нормальное разрушение; 2-5 – дефектные разрушения

Прочность бетона R , МПа, вычисляется для каждого образца по формуле:

$$R = kN / A \quad (1.1)$$

где N – разрушающая нагрузка, Н;

A – рабочая площадь образца (среднее арифметическое площадей двух противоположных граней), мм²;

k – масштабный коэффициент, определяемый в зависимости от размеров ребер образцов и принимаемый не менее значений, приведенных в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения масштабных коэффициентов для кубов различных размеров

Куб	Размер ребра, мм				
	70	100	150	200	300
Масштабный коэффициент k	0,85	0,95	1,0	1,05	1,1

Значения полученных прочностей для опытных образцов заносят в журнал испытаний (таблице 1.2).

Таблица 1.2 – Пример заполнения журнала испытаний бетонных кубов

Дата	Номер образца	Масса	Размеры	Плотность	Площадь	Максимальная нагрузка	Прочность образца	Средняя из серии*
		кг	см	кг/м ³	см ²	кН	МПа	МПа
01.03	1	8,118	15,2× ×15,1× ×14,8	2390	229,5	5049	22	

* Прочность бетона в одной серии образцов определяют как среднеарифметическое значение прочностей \bar{R} в i -ой серии:

- из двух образцов – по двум образцам;
- из трех образцов – по двум наибольшим по прочности образцам;
- из четырех образцов – по трем наибольшим по прочности образцам.

При отбраковке дефектных образцов прочность бетона в серии определяют по всем оставшимся образцам (не менее двух).

Коэффициент вариации прочности бетона V_m , %, определяют по формуле:

$$V_m = S_m / R_m, \quad (1.2)$$

где S_m – среднее квадратичное отклонение прочности в партии, характеризующее изменчивость прочности (стандарт);

R_m – среднее значение временного сопротивления бетона сжатию, установленное при испытании партии стандартных кубов:

$$R_m = B / (1 - 1,64V_m^{\text{завода}}), \quad (1.3)$$

где B – класс бетона по прочности на сжатие;

$V_m^{\text{завода}} = 0,135$ – коэффициент вариации прочности для тяжелого бетона, установленный заводами изготовителями.

Вопросы для самопроверки

1. Какие классы и марки бетона установлены нормами?
2. Что такое «класс бетона по прочности на сжатие»?
3. Что такое среднее квадратическое отклонение прочности бетона?
4. Чему равна гарантированная прочность бетона для заданного класса бетона?
5. Как влияет время и условия твердения на прочность бетона?
6. Какие виды объемных и силовых деформаций испытывает бетон?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

2.1 Цель работы

Определение основных физико-механических характеристик стальной арматуры железобетонных конструкций при растяжении.

2.2 Задачи работы

1. Ознакомление с методикой испытания арматурных стержней на растяжение.
2. Определение физического и условного предела текучести.
3. Определение временного сопротивления разрыву.

2.3 Отбор образцов

Отбор образцов арматуры производится в соответствии с требованиями ГОСТ 12004-81* «Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение».

Для испытания на растяжение применяются образцы арматуры с необработанной поверхностью диаметром от 3 до 80 мм. Для горячекатаной стержневой арматуры диаметром более 20 мм допускается проводить испытания на обточенных образцах по ГОСТ 1497-84 с сохранением поверхности проката на головках образца.

Полная длина образца арматуры зависит от рабочей длины образца и конструкции захватов испытательной машины. Рабочая длина должна составлять не менее $10d$ и не менее 200 мм для стержневой и проволоочной арматуры и 350 мм для арматурных канатов.

Площадь поперечного сечения необработанных образцов арматуры периодического профиля A_s , мм², вычисляют по формуле:

$$A_s = m / \rho l, \quad (2.1)$$

где m – масса испытываемого образца, г;

l – длина образца, мм;

$\rho = 0,00785$ г/мм³ – плотность стали.

Для обточенных и круглых образцов площадь поперечного сечения определяют измерением диаметра в трех сечениях: в середине и по концам рабочей длины, в каждом сечении в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Площадь определяют по среднему арифметическому шести измерений диаметра.

Площадь поперечного сечения каната определяют по сортаменту.

Образцы арматурной стали взвешивают на весах по ГОСТ 29392-92 с погрешностью не более 1,0 г при $d < 10$ мм; 2,0 г при $d = 10...20$ мм и не более 1 % от массы образца при $d > 20$ мм.

2.4 Испытание арматуры

Перед испытанием на рабочей части образца с помощью делительной машины, калибровочной скобы или керном наносятся риски на расстоянии, кратном 10 мм и не превышающем диаметра образца.

Испытание образцов арматуры производится на испытательных машинах, обеспечивающих надежное центрирование образцов в захватных устройствах и плавность нагружения.

Для измерения деформации образца используются тензометры.

Загружение образцов арматуры при испытании производят ступенями, величина которых принимается равной примерно 5 % от предполагаемого разрывного усилия. После каждого этапа дается выдержка не более 20 секунд для снятия отсчетов по приборам.

Тензометры Т-1 и Т-2 устанавливаются в середине рабочей длины образца на противоположных сторонах при нагрузке, равной примерно 10 % от максимального значения.

Величины нагрузок и показания тензометров фиксируются. По этим данным строится диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » (рисунок 2.1).

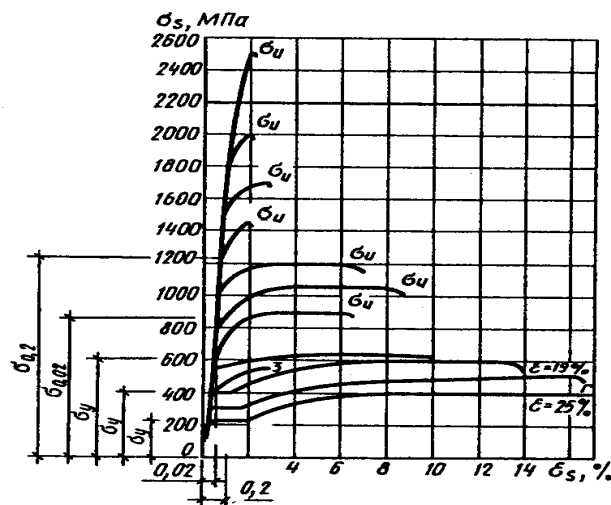


Рисунок 2.1 – Характерные диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » для арматурных сталей

Временное сопротивление σ_u , МПа, вычисляют по формуле:

$$\sigma_u = N_{\max} / A_s, \quad (2.2)$$

где N_{\max} – разрывное усилие, Н;

A_s – площадь поперечного сечения арматуры, мм².

Физический предел текучести σ_y , МПа, для арматурных сталей, имеющих площадку текучести, определяется по формуле:

$$\sigma_y = N_y / A_s, \quad (2.3)$$

где N_y – наименьшая нагрузка, при которой происходит деформация образца (текучесть) при постоянных напряжениях.

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, для сталей, не имеющих ярко выраженной площадки текучести, соответствует напряжению, при котором остаточные деформации равны 0,2 %. Значение $\sigma_{0,2}$ мо-

жет быть определено аналитически с погрешностью не более 5 МПа на основе определения напряжения, при котором остаточная деформация образца равна 0,2 % (0,002).

Вопросы для самопроверки

1. Какие вы знаете виды стальной арматуры, применяемой в железобетонных конструкциях?
2. Изобразить диаграммы растяжения различных арматурных сталей и указать характерные точки на них.
3. Что такое физический предел текучести?
4. Что такое условный предел текучести?
5. Чем характеризуются пластические свойства арматурных сталей?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ

3.1 Цель работы

1. Получить наглядное представление о характере развития напряженно-деформированного состояния балки при нагружении вплоть до разрушения по нормальному сечению.
2. Установить экспериментальные значения момента трещинообразования, разрушающего момента, контрольного прогиба, ширины раскрытия трещин, деформаций бетона и арматуры.
3. Определить расчетные значения контролируемых величин и сопоставить их с экспериментальными, дать анализ полученных результатов и сделать выводы по работе в целом.

3.2 Особенности напряженно-деформированного состояния в балке при действии изгибающего момента

При чистом изгибе железобетонной балки существуют напряжения в сечениях, нормальных к продольной оси элемента. В процессе ступенчатого нагружения в этих сечениях можно отметить 3 характерные стадии работы.

Стадия I – стадия упругой работы бетона. Напряжения в бетоне и арматуре малы, в них развиваются преимущественно упругие деформации. Эпюры напряжений в бетоне сжатой и растянутой зон – близкие к треугольным (рисунок 3.1, *а*).

С увеличением нагрузки в бетоне растянутой зоны развиваются неупругие деформации, эпюра напряжений становится криволинейной. Когда напряжения в бетоне на растянутой грани достигают предела прочности на растяжение R_{bt} , наступает *стадия I а* (рисунок 3.1, *б*).

Стадия II – наступает с появлением трещин в растянутой зоне бетона (рисунок 3.1, *в*). Растягивающие напряжения в сечении с трещиной воспринимаются только растянутой арматурой. С увеличением нагрузки эпюра напряжений в сжатом бетоне искривляется, но напряжения всегда остаются меньше предела прочности на сжатие R_b . Напряжения в растянутой арматуре в конце стадии II (*стадия II а*) могут достигать предельной величины R_s (рисунок 3.1, *г*).

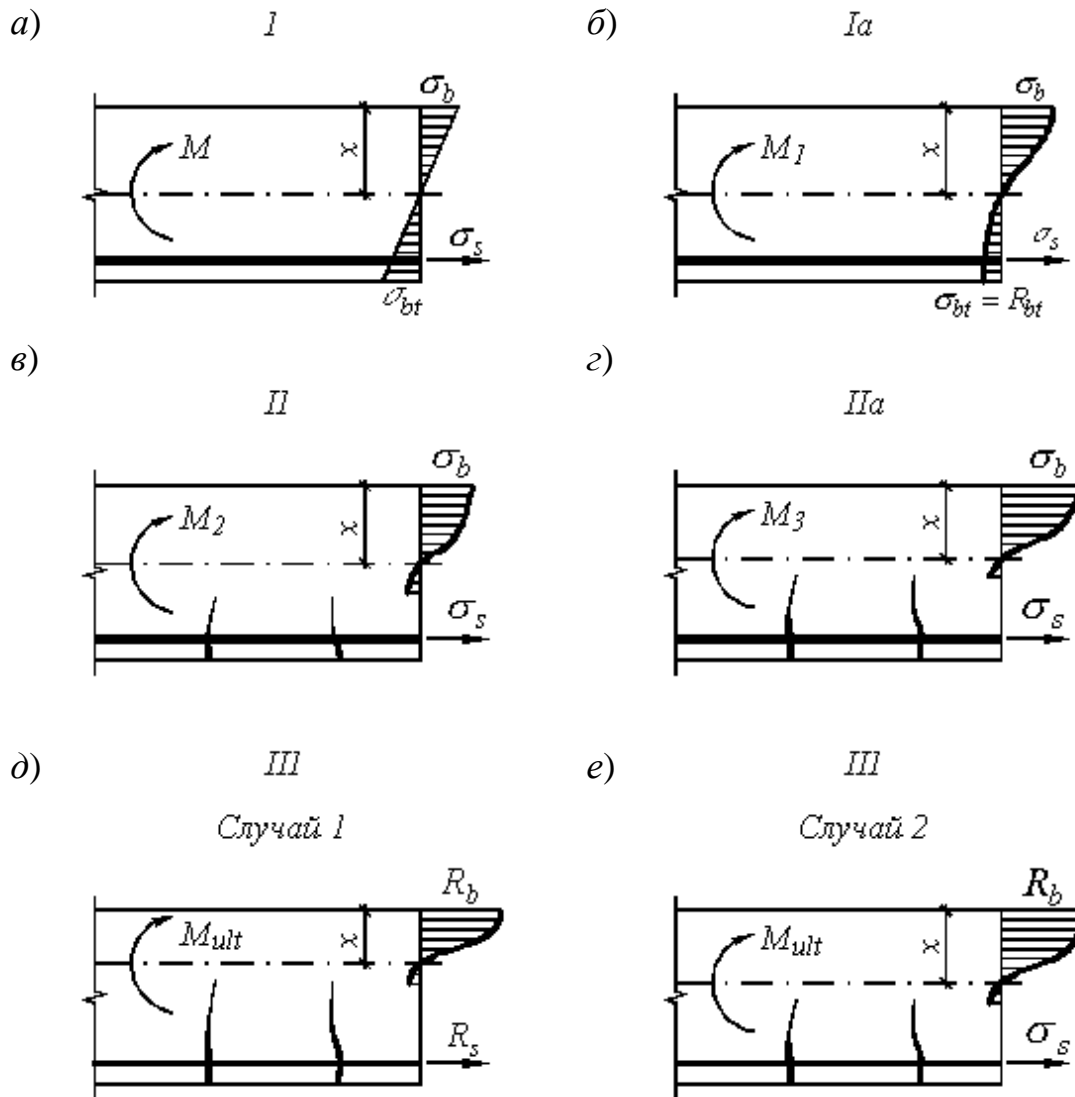


Рисунок 3.1 – Стадии напряженно-деформированного состояния сечений балки при изгибе

Стадия III – стадия разрушения. Разрушение изгибаемых железобетонных элементов могут произойти по одному из двух случаев.

Случай 1 (рисунок 3.1, д). С достижением в растянутой арматуре физического предела текучести в ней развиваются большие пластические деформации. Трещины увеличиваются по ширине и высоте, уменьшается высота сжатой зоны бетона. Это приводит к росту напряжений в сжатом бетоне, и при достижении ими предела прочности R_b происходит раздробление бетона сжатой зоны и разрушение балки (рисунок 3.2).

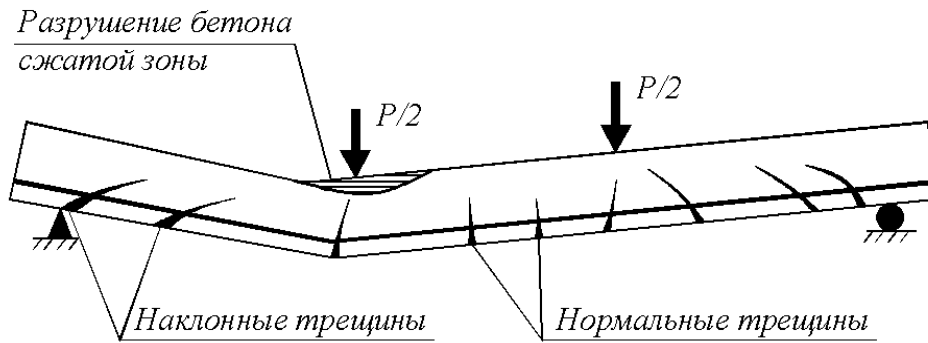


Рисунок 3.2 – Характер разрушения железобетонной балки по нормальному сечению при изгибе

По характеру рассмотренное разрушение является пластическим и происходит при постоянной или незначительно увеличивающейся нагрузке. Непосредственно перед разрушением прогиб балки может достигать $1/25 \dots 1/50$ пролета, а ширина раскрытия трещин $5 \dots 10$ мм.

Случай 2 (рисунок 3.1, *e*). Напряжения в растянутой арматуре никогда не превышают предела текучести. Напряжения в сжатом бетоне увеличиваются с ростом нагрузки до предельного значения R_b и происходит его разрушение. Рассмотренный характер разрушения наблюдается в элементах с избыточным содержанием растянутой арматуры (переармированных).

Характер разрушения по случаю 2 – хрупкий, разрушение происходит при малых прогибах и незначительной ширине раскрытия трещин.

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

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

В данной лабораторной работе разрушение балки происходит по случаю 1, как наиболее характерному для нормальных сечений железобетонных конструкций, используемых в промышленном и гражданском строительстве.

Стадии напряженного состояния положены в основу расчета железобетонных элементов по предельным состояниям. Так, расчет по несущей способности (прочности, устойчивости формы и положения, выносливости, одновременному действию силовых факторов и неблагоприятных условий среды) 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.

3.3 Исходные данные по железобетонной балке

В начале определяют и записывают в журнал лабораторных работ данные о примененных материалах. Такие характеристики как проектный класс бетона, возраст бетона к моменту испытания и класс арматуры устанавливают путем непосредственных испытаний образцов (см. лабораторные работы № 1 и № 2).

Для определения прочности бетона на осевое сжатие R_m проводят испытание кубика, изготовленного из бетона рабочего состава и находившегося в тех же условиях твердения, что и опытная балка. На основании полученных результатов, используя эмпирическую зависимость, можно получить призмную прочность бетона:

$$R_b = R_m (0,77 - 0,00125R_m) \geq 0,72R_m, \quad (3.1)$$

где R_m – средняя кубиковая прочность бетона (т.е. среднестатистическое значение прочности бетона).

Предельное сопротивление бетона осевому растяжению R_{bt} может быть определено по формуле:

$$R_{bt} = 5B / (45 + B), \quad (3.2)$$

или

$$R_{bt} = 0,5k\sqrt[3]{B^2} \quad \text{или} \quad R_{bt} = 0,5k\sqrt[3]{R_m^2}, \quad (3.3)$$

где $k = 0,8$ – понижающий коэффициент для бетонов классов В35 и ниже;

B – класс бетона по прочности на осевое сжатие;

Значение начального модуля упругости может быть установлено по эмпирической формуле:

$$E_b = \frac{55000B}{27 + B}. \quad (3.4)$$

Механические характеристики арматуры, в виду их незначительного разброса, могут быть определены не только по результатам испытаний, но и по таблицам [1]. Для арматуры класса А-I, применяемой в опытных балках в качестве продольной, сопротивления осевому сжатию и растяжению $R_s = R_{sc} = 235 \text{ МПа}$, а модуль упругости $E_s = 210000 \text{ МПа}$.

Затем студенты производят измерения всех геометрических размеров балки, определяют диаметр продольной арматуры и приводят опалубочные и арматурные эскизы балки в журнале. Пример выполнения эскизов дан на рисунке 3.3.

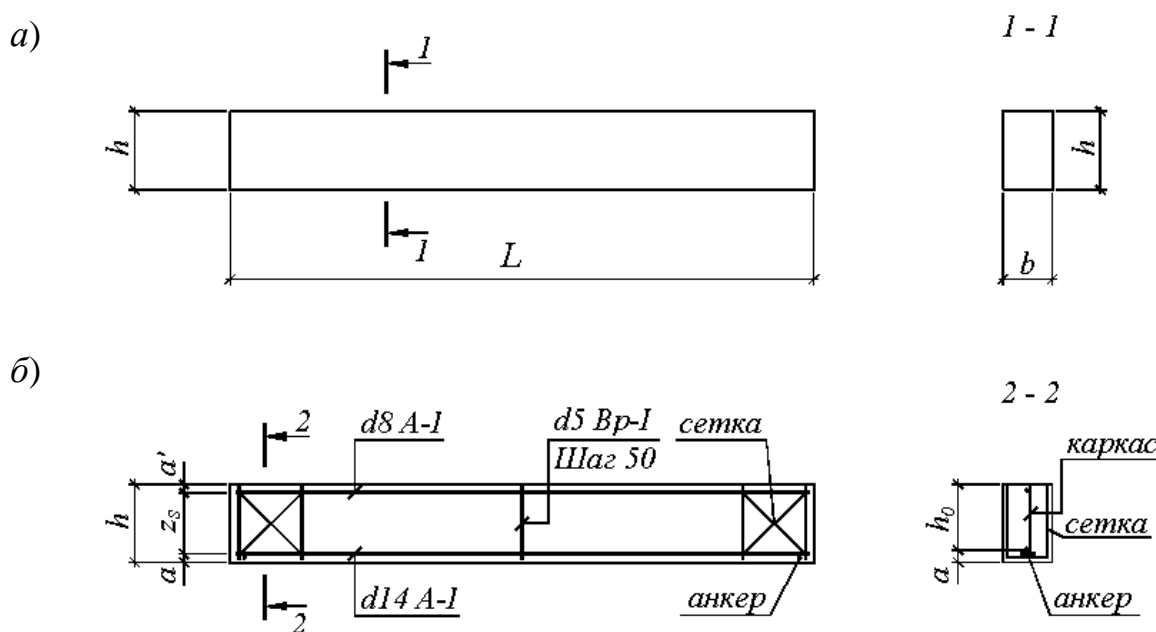


Рисунок 3.3 – Опалубочные размеры (а) и армирование опытной балки (б)

Армирование балки выполнено одиночным сварным каркасом. В каркасе рабочей арматурой является только продольная растянутая. Для предотвращения ее продергивания к концам стержней приварены анкера из коротышей того же диаметра. С этой же целью на концах балки установлены корытообразные сетки.

Схемы нагружения и расположения приборов выполняют с натуры, с учетом данных, полученных при обмерах (рисунок 3.4).

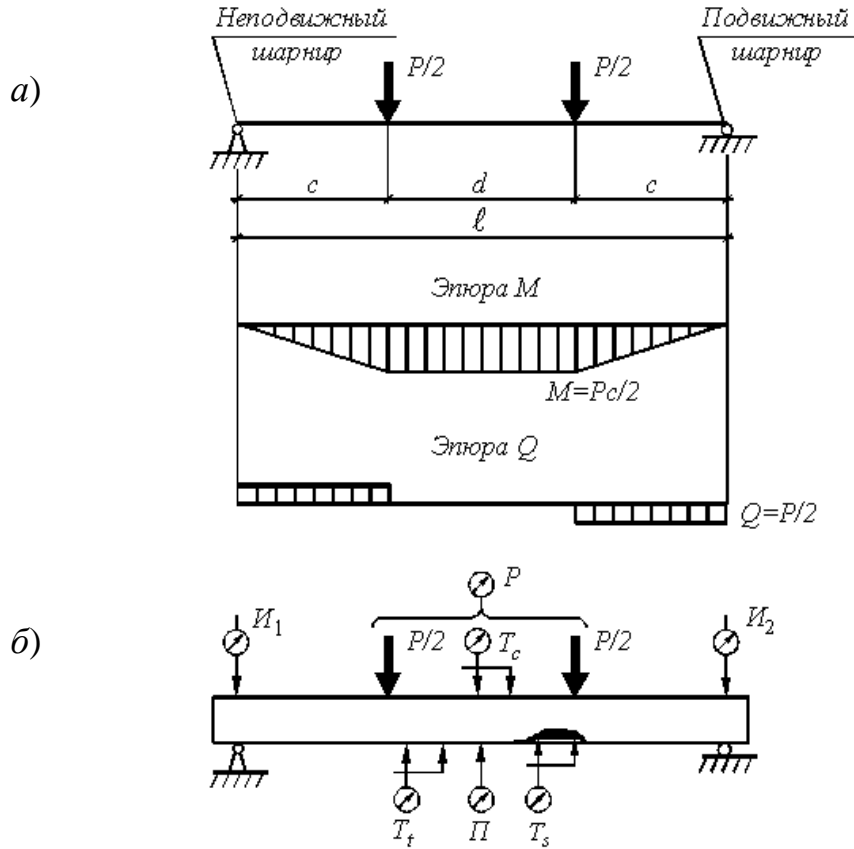


Рисунок 3.4 – Схема загрузки (а)
и схема расположения приборов (б)

Для обеспечения разрушения балки по нормальному сечению две сосредоточенные нагрузки равной величины прикладываются в пределах средней трети пролета балки. При такой схеме загрузки между точками приложения нагрузок будет иметь место чистый изгиб.

Тензометры T_c , T_t , T_s устанавливают для измерения деформаций, соответственно, в сжатом, растянутом бетонах и растянутой арматуре.

Прогибы в середине пролета балки фиксируют прогибомером II . Для учета погрешностей прогибомера, вызванных смятием бетона на шарнирных опорах и деформациями упругих прокладок, устанавливают индикаторы I_1 и I_2 . Величина нагрузки на балку определяется по силомеру P .

3.4 Испытание балки

Испытание начинают с пробного нагружения нагрузкой, составляющей примерно 5% от ожидаемой разрушающей для проверки работы приборов и выбирания люфтов. Затем балку частично разгружают до 1% от разрушающей нагрузки с целью сохранения плотных контактов силовых устройств и приборов с испытываемой балкой. При этой условной нулевой нагрузке снимают показания приборов, которые считают нулевыми.

Загружение балки производят ступенчато. Степень нагрузки не должна превышать 10% контрольной по прочности [2]. На каждой ступени нагрузку выдерживают как постоянную не менее 10 мин. Так как во время выдержки проявляются пластические деформации бетона (деформации ползучести), показания приборов фиксируют и записывают в журнал дважды – в начале и в конце выдержки на каждой ступени.

Во время каждой выдержки производят осмотр балки визуально, фиксируют трещины и отсчетным микроскопом определяют ширину их раскрытия. Момент появления трещин может быть также установлен по «скачку» показаний приборов в растянутой зоне. Рядом с образовавшимися трещинами выделяют их очертание при помощи маркеров или туши с выполнением перпендикулярных засечек в районе устья трещины и делают запись в виде дроби: в числителе – степень нагружения, в знаменателе – ширина раскрытия трещины, замеренная на уровне растянутой арматуры. Таким образом в конце испытания можно воспроизвести и проанализировать характер разрушения конструкции, а также оценить влияние различных факторов.

В виду ограниченности времени для выполнения лабораторной работы ведущим преподавателем могут быть сокращены число этапов нагружения и время выдержки.

При нагрузке, составляющей 60% от разрушающей, снимают приборы с растянутой зоны балки, а при 80% – все приборы для избежания возможного их повреждения.

Процесс разрушения начинается с лавинообразного роста прогибов при незначительном увеличении нагрузки и заканчивается раздроблением сжатого бетона, когда при попытке увеличения нагрузка резко падает. При испытании балки в стадии разрушения следует соблюдать особую осторожность.

Значения разрушавшей нагрузки, а также нагрузки, при которой появляются трещины, и значения контрольных нагрузок по деформациям и раскрытию трещин предварительно сообщает ведущий преподаватель.

При испытании балки с разрушением по нормальному сечению определяют по приборам или визуально и записывают в журнал следующие параметры:

1. Величина внешней нагрузки.
2. Деформация бетона и арматуры в растянутой зоне.
3. Деформация бетона в сжатой зоне.
4. Прогиб балки и ее перемещение из-за смятия на опорах.
5. Характерные моменты испытаний: нагрузка, при которой появились трещины, контрольная ширина раскрытия трещин, разрушающая нагрузку и др.

3.5 Обработка опытных данных

Обработка производится с целью получения абсолютных значений контрольных параметров на основании показаний приборов.

Величины внешних нагрузок P фиксируют непосредственно силовометром испытательного устройства и в обработке не нуждаются. При загрузке балки двумя сосредоточенными силами, приложенными на расстоянии $1/3$ расчетного пролета ($c = \ell/3$, рисунок 3.4), опытный момент трещинообразования определяют по формуле:

$$M_{crc,exp} = \frac{(P_{crc,exp} + 0,5p)\ell}{3} + \frac{g\ell^2}{8}, \quad (3.5)$$

где $P_{crc,exp}$ – значение опытной нагрузки, при которой произошло образование трещин;

p – вес загрузочных устройств (траверсы, тяги и т.п.);

g – погонная нагрузка от собственного веса балки;

ℓ – расчетный пролет балки.

Предельный разрушающий момент определяют по формуле:

$$M_{ult,exp} = \frac{(P_{ult,exp} + 0,5p)\ell}{3} + \frac{g\ell^2}{8}, \quad (3.6)$$

где $P_{ult,exp}$ – значение опытной нагрузки, при которой было зафиксировано разрушение балки по одному из рассмотренных выше случаев.

Для перевода показаний тензометров в относительные деформации бетона и арматуры необходимо выполнить следующие операции.

Вначале определяют абсолютные деформации, для чего из показаний тензометров на каждом этапе T_i вычитают их показания при условной нулевой нагрузке T_0 . Затем абсолютные деформации делят на величину базы тензометра S в тех же единицах измерения и получают абсолютные деформации:

$$\varepsilon_i = (T_i - T_0) / S. \quad (3.7)$$

Аналогично переводят в значение прогибов балки показания индикаторов и прогибомера. Из показаний приборов на каждом этапе вычитают нулевые отсчеты, в результате чего получают абсолютные перемещения балки на опорах I_{1i} , I_{2i} и деформации в пролете Π_i . Прогибы балки f находят как разность между ее деформациями в пролете и средними перемещениями на опорах:

$$f_i = \Pi_i - \frac{I_{1i} + I_{2i}}{2}. \quad (3.8)$$

Высота сжатой зоны бетона x в зависимости от относительных деформаций сжатого бетона ε_b и растянутой арматуры ε_s упрощенно может быть определена из выражения:

$$x = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_b + \varepsilon_s} h_0. \quad (3.9)$$

Характерные моменты напряженно-деформированного состояния берут непосредственно из результатов испытаний.

Для контроля правильности полученных результатов и наглядности характера поведения бетона и арматуры в составе железобетонной балки под нагрузкой, в журнале лабораторных работ строят графики зависимостей $P - f$; $P - \varepsilon_s$; $P - \varepsilon_b$.

3.6 Теоретические расчеты балки

Опытная балка запроектирована и изготовлена таким образом, что ее разрушение по нормальному сечению происходит по случаю 1,

причем сжатая продольная арматура в работе не участвует, т.е. выполняются следующие условия: $\xi < \xi_R$ и $x < 2a'$. Контрольные нагрузки по раскрытию трещин и деформациям назначаются для стадии II (стадии работы с трещинами или стадии эксплуатации).

При расчетах необходимо установить следующие теоретические параметры балки: момент, при котором появляются трещины M_{crc} ; ширину раскрытия трещин a_{crc} и прогиб балки f при контрольной нагрузке; несущую способность балки по изгибающему моменту M_{ult} .

Несущая способность нормального сечения изгибаемого элемента прямоугольного сечения с одиночной арматурой определяется по формуле:

$$M_{ult} = R_b b x (h_0 - 0,5x), \quad (3.10)$$

$$x = R_s A_s / (R_b b). \quad (3.11)$$

Момент появления трещин вычисляют по формуле:

$$M_{crc} = R_{bt} W_{pl}. \quad (3.12)$$

Здесь W_{pl} – упругопластический момент сопротивления:

$$W_{pl} = b(h - x_{crc}) \left(\frac{h}{2} + \frac{x_{crc}}{b} \right) + 2\alpha A_s \left(h_0 - \frac{x_{crc}}{3} \right), \quad (3.13)$$

где $\alpha = E_s / E_b$ – коэффициент приведения арматуры к бетону; x_{crc} – высота сжатой зоны в момент, предшествующий образованию трещин:

$$x_{crc} = h - \frac{bh^2}{2} (bh + \alpha A_s). \quad (3.14)$$

Ширина раскрытия трещин в балке, армированной гладкой арматурой, при контрольном моменте по раскрытию трещин $M_{con,crc}$ определяется по формуле:

$$a_{crc} = 26 \frac{\sigma_s}{E_s} (3,5 - 100\mu) \sqrt[3]{d_s}, \quad (3.15)$$

$$\sigma_s = R_s \frac{M_{con,crc}}{M_{ult}}, \quad (3.16)$$

$$\mu = \frac{A_s}{bh_0}, \quad (3.17)$$

где d_s – диаметр продольной растянутой арматуры, мм;
 μ – коэффициент армирования сечения балки.

Прогиб балки в середине пролета при наличии контрольного изгибающего момента по деформациям M_{con} вычисляют по формуле:

$$f = \frac{M_{con} - 0,02bh^2R_{bt}}{0,4E_sA_s} \left(\frac{1}{8} - \frac{c^2}{6\ell^2} \right) \ell^2, \quad (3.18)$$

где b , h , h_0 , c , ℓ – см. рисунки 3.3, 3.4.

Все результаты расчетов заносятся в журнал лабораторных работ.

3.7 Сопоставление теоретических и экспериментальных данных, выводы по работе

Сопоставление данных производят в форме таблицы 3.1, в которой должны быть отражены расчетные и опытные значения контрольных характеристик:

- момент появления трещин;
- ширина раскрытия трещин и прогибы при контрольной нагрузке;
- разрушающий изгибающий момент;
- отклонения расчетных значений от опытных, выраженные в процентах, вычисляют по формуле:

$$\pm \delta = \frac{A_{calc} - A_{exp}}{A_{calc}} \cdot 100, \quad (3.19)$$

где A_{calc} – теоретически вычисленное значение контролируемой величины;

A_{exp} – значение контролируемой величины, полученное в опыте.

Таблица 3.1 – Пример сопоставления опытных и теоретических данных

Показатели	Контрольные характеристики			
	M	M_{crc}	a_{crc}	f
Опытные значения A_{exp}	1,35	0,36	0,24	4,34
Расчетные значения A_{calc}	1,24	0,32	0,32	4,62
Отклонения $\pm \delta = A_{exp} - A_{calc}$	+0,11	+0,04	-0,08	-0,28
Погрешность $(\pm \delta / A_{exp}) \cdot 100\%$	+8,2	+11,1	-32,4	-6,5

В выводах необходимо отметить: по какому сечению и случаю произошло разрушение балки, характер разрушения, запасы ее прочности, жесткости и трещиностойкости, особенности деформирования балки на всех этапах, величину ширины раскрытия трещин и относительного прогиба в стадии разрушения, предельную деформативность бетона, значение момента трещинообразования в процентном отношении к разрушающему и другие наиболее характерные особенности проведенных исследований.

Вопросы для самопроверки

1. Как выглядит диаграмма $\sigma - \varepsilon$ бетона при сжатии? То же для мягких сталей при растяжении?
2. Что такое ползучесть и релаксация?
3. Чем характеризуется каждая из стадий напряженного состояния при изгибе?
4. Случаи разрушения по нормальному сечению при изгибе?
5. Назначение продольной арматуры в изгибаемых элементах. На какое усилие она рассчитывается?
6. Почему кубиковая прочность бетона больше призмной?
7. Чем отличается по внешнему виду арматура классов А-I, А-II и А-III? То же по В-I и Вр-I?
8. Почему при расчете прочности нормальных сечений не учитывается работа бетона на растяжение?
9. Виды деформаций бетона.
10. Какие расчеты элементов выполняются по 1-й группе предельных состояний? То же по 2-й?
11. Нагрузки и прочностные характеристики материалов. Система коэффициентов.

12. Виды классов и марок бетонов. Классификация арматуры.
13. Как численно устанавливается граница между случаем 1 и 2 разрушения?
14. Основные недостатки железобетона.
15. По какой стадии напряженного состояния производится расчет прочности? То же по жесткости и трещиностойкости?
16. Какое армирование считается одиночным, а какое двойным?
17. Когда по расчету требуется сжатая арматура? Когда она учитывается в расчете?
18. Какие стали называются твердыми, а какие мягкими? Как определяется предел текучести для твердых сталей?
19. На каких участках изгибаемых элементов появляются нормальные трещины?
20. Назначение защитного слоя в железобетонных конструкциях.

*Кроме указанных вопросов необходимо знать формулы для расчета прочности, момента появления трещин, ширины раскрытия трещин, прогибов и принятые в них условные обозначения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ НА ИЗГИБ С РАЗРУШЕНИЕМ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ

4.1 Цель работы

1. Получить наглядные представления о характере развития напряженно-деформированного состояния балки при нагружении вплоть до разрушения по наклонному сечению.
2. Установить экспериментальные значения усилий, при которых появляются трещины, разрушающих усилий, контрольных прогибов, ширины раскрытия трещин, относительных деформаций бетона и арматуры.

3. Определить расчетные значения тех же величин и сопоставить с экспериментальными, дать выводы по работе в целом.

4.2 Особенности напряженно-деформированного состояния в балке при совместном действии поперечной силы и изгибающего момента

При поперечном изгибе, т.е. совместном действии поперечной силы и изгибающего момента главные напряжения действуют под некоторым углом к продольной оси элемента, поэтому в растянутой зоне появляются наклонные трещины. В процессе нагружения элемента в нем наблюдаются те же три характерных стадии напряженного состояния, что и в нормальных сечениях при чистом изгибе: стадия упругой работы бетона, стадия работы с трещинами и стадия разрушения (см. лабораторную работу № 3).

Разрушение изгибаемых элементов по наклонным сечениям может произойти по одной из трех причин и соответственно по одной из трех схем:

1. От раздробления стенки между наклонными трещинами действием главных сжимающих напряжений. По характеру разрушение является хрупким. Этот тип разрушения не является характерным для изгибаемых элементов, встречается относительно редко, главным образом в сильно нагруженных балках таврового и двутаврового профилей. Считается, что прочность элемента на действие главных сжимающих напряжений обеспечена, если соблюдается условие [1]:

$$Q \leq 0,3\varphi_{w,1}\varphi_{b,1}R_bbh_0, \quad (4.1)$$

$$\text{где } \varphi_{b,1} = 1 - 0,01R_b; \quad (4.2)$$

$\varphi_{w,1}$ – коэффициент, учитывающий влияние хомутов, определяемый по формуле (но не более 1,3):

$$\varphi_{w,1} = 1 + 5\mu_w\alpha. \quad (4.3)$$

Опытная балка изготавливается и испытывается таким образом, что это условие соблюдается всегда.

2. Разрушение от действия изгибающего момента, когда части элемента, разделенные наклонной трещиной, поворачиваются вокруг мгновенного центра вращения, находящегося на пересечении наклонной трещины с равнодействующей усилий в сжатой зоне бетона, ха-

рактер разрушения – пластический, разрушение происходит при больших деформациях, значительной ширине раскрытия трещин и аналогичен случаю I разрушения нормальных сечений.

Однако для реальных конструкций разрушение по наклонному сечению от действия изгибающего момента не является характерным, поскольку прочность наклонных сечений обычно не ниже прочности нормальных. Наклонные сечения на действие изгибающего момента обычно не рассчитывают, а предусматривают лишь ряд конструктивных мероприятий.

3. Разрушение от действия поперечной силы, при котором после среза сжатого бетона происходит смещение по вертикали частей балки, разделенных наклонной трещиной (рисунок 4.1, в). По характеру этот вид разрушения является хрупким и происходит при незначительных деформациях и малой ширине раскрытия трещин. Разрушение балки в рассматриваемой лабораторной работе предусмотрено именно по этому случаю, как наиболее характерному.

В наклонных сечениях изгибаемых элементов поперечная сила воспринимается бетоном сжатой зоны, хомутами и отгибами (в опытной балке отгибы не установлены).

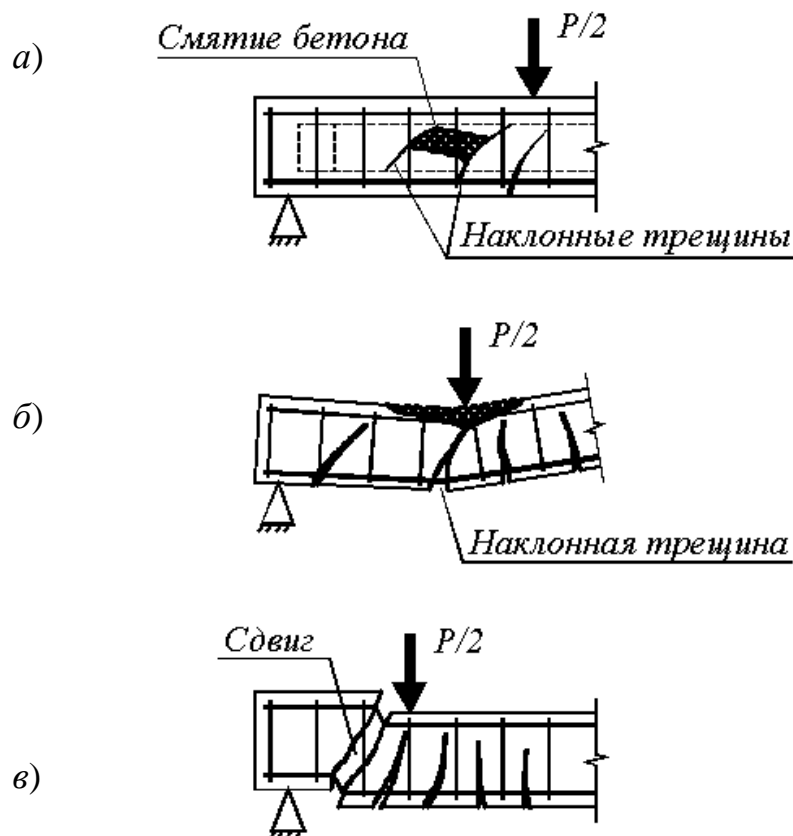


Рисунок 4.1 – Характер разрушения изгибаемых элементов по наклонному сечению от действия:

a – главных сжимающих напряжений;
 b – изгибающего момента; c – поперечной силы

В виду неравномерного раскрытия наклонных трещин работа хомутов и отгибов, расположенных в трещине ближе к сжатой зоне, используется не полностью. Поэтому в расчетные формулы вместо расчетного сопротивления арматуры хомутов R_s вводится заниженное на 20% значение R_{sw} .

4.3 Исходные данные о железобетонной балке

Данные о примененных материалах определяют аналогично тому, как описано в лабораторных работах № 1 – № 3. На основании результатов испытания бетонного куба по формулам (3.1) – (3.4) вычисляют характеристики бетона.

Нормативные сопротивления продольной рабочей арматуры класса А-I сжатию и растяжению принимаются $R_s = R_{sc} = 235$ МПа, а ее модуль упругости $E_s = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Поперечная арматура (хомуты) выполнена из обыкновенной холоднотянутой проволоки класса Вр-I, ее нормативное сопротивление растяжению в наклонных сечениях $R_{sw} = 324$ МПа.

Другие данные о примененных материалах сообщает ведущий преподаватель.

Сведения о размерах, армировании, схеме загрузки и расположении приборов принимают на основе непосредственных замеров балки, установленной на испытательном стенде. В журнале лабораторных работ выполняют необходимые эскизы, схемы и эпюры. Для контроля правильности данных о балке полезно знать, что при выполнении лабораторных работ № 3 и № 4 испытывают балки одной конструкции. Отличие в характере их разрушения достигается тем, что в лабораторной работе № 4 нагрузка на балку приложена ближе к опорам.

Ожидаемый характер разрушения балки по наклонному сечению приведен на рисунок 4.1, в.

4.4 Испытание балки

Методика испытания балки с разрушением по наклонному сечению та же, что и по нормальному сечению. Т.е. вначале производится пробное нагружение и разгрузка, затем ступенчатое нагружение с выдержкой на каждом этапе, осмотром и снятием отсчетов по контрольно-измерительным приборам. В журнал лабораторных работ записывают те же параметры и характерные моменты испытаний.

Испытание балки необходимо производить с особой осторожностью, что обуславливается хрупким характером ее разрушения, а также значительно большей величиной разрушающей нагрузки по сравнению с разрушением по нормальному сечению.

Следует помнить, что прочность наклонного сечения обеспечивается сопротивлением разрушению бетона и хомутов. При появлении сквозной наклонной трещины бетон из работы выключается, резко снижается прочность балки и происходит ее разрушение.

После испытаний необходимо установить и записать в журнал недостающие сведения о балке (величину горизонтальной проекции наклонной трещины, число хомутов в наклонном сечении и др.) и сделать рисунок разрушенной балки.

4.5 Обработка опытных данных

Требования к обработке опытных данных в лабораторной работе № 4 те же, что и в лабораторной работе № 3, методика обработки данных аналогична. Значение поперечной силы $Q = P/2$ (рис. 3.3). Перевод показаний приборов в относительные удлинения бетона и арматуры, деформации и высоту сжатой зоны производится по формулам, приведенным в описании лабораторной работы № 3.

По результатам обработки опытных данных в журнале лабораторных работ строят графики: нагрузка – деформации сжатого бетона $P - \varepsilon_b$, нагрузка – деформации растянутой арматуры $P - \varepsilon_s$ и нагрузка – прогиб $P - f$.

4.6 Теоретические расчеты балки

В лабораторной работе № 4 разрушение балки по наклонному сечению предусмотрено от поперечной силы по схеме 3. Несущая способность наклонного сечения по поперечной силе может быть определена из выражений:

$$Q = Q_{sw} + Q_b, \quad (4.4)$$

$$Q_{sw} = \sum R_{sw} A_{sw} = R_{sw} A_{sw} n / s, \quad (4.5)$$

$$Q_b = 2R_{bt} b h_0^2 / c, \quad (4.6)$$

где в выражениях (4.2) – (4.3): Q_{sw} и Q_b – составляющие поперечной силы, воспринимаемые соответственно хомутами и бетоном по наклонному сечению; A_{sw} – площадь сечения хомутов; n – количество хомутов, пересекаемых наклонной трещиной; s – шаг хомутов; c – длина горизонтальной проекции наклонной трещины на продольную ось:

$$c = \sqrt{2R_{bt} b h_0^2 / Q_{sw}}. \quad (4.7)$$

Значения главных растягивающих напряжений, при которых появились наклонные трещины, вычисляют по формуле:

$$\sigma_{mt} = \frac{3M}{bh^2} + \frac{3}{bh} \sqrt{\frac{M^2}{h^2} + Q^2}, \quad (4.8)$$

где M и Q – изгибающий момент и поперечная сила в средней части наклонного сечения при появлении первой трещины.

Ширина раскрытия наклонной трещины при контрольной поперечной силе по раскрытию трещин:

$$a_{crc} = \frac{0,72\sigma_{sw}d_w}{E_b(d_w\alpha/h_0 + 0,15 + 0,3\mu_w\alpha)}. \quad (4.9)$$

Напряжения в хомутах, пересекаемых наклонной трещиной:

$$\sigma_{sw} = \frac{s(Q_{con} - 0,6Q_b)}{A_{sw}h_0}, \quad (4.10)$$

где d_w – диаметр хомутов, см;

s – шаг хомутов;

A_{sw} – площадь хомутов в одном сечении (в нашем случае площадь одного поперечного стержня);

$\alpha = E_s / E_b$ – коэффициент приведения арматуры к бетону.

Коэффициент армирования наклонного сечения вычисляют по формуле:

$$\mu_w = \frac{A_{sw}}{bs}. \quad (4.11)$$

С учетом (4.4) – (4.7) значение разрушающей поперечной силы определяют по формуле:

$$Q_{ult,calc} = 2R_{bt}bh_0^2 / c + Q_{sw}c, \quad (4.12)$$

где c – должно удовлетворять условию $h_0 < c < 2h_0$.

Тогда нагрузка, соответствующая теоретической разрушающей по поперечной силе, может быть вычислена по формуле:

$$P_{ult,calc} = Q_{ult,calc} - g\ell^2 / 8 - p / 2, \quad (4.13)$$

где g и p – значения нагрузок от собственного веса балки и грузочных устройств соответственно.

Прогиб балки определяют по формуле (3.18). Все расчеты и их результаты должны быть приведены в журнале испытаний.

4.7 Сопоставление теоретических и экспериментальных данных, выводы по работе

При сопоставлении полученных теоретических и экспериментальных данных необходимо сравнивать следующие контрольные характеристики: значение разрушающей поперечной силы, главных растягивающих напряжений в наклонном сечении и предела прочности бетона при растяжении, а также ширины раскрытия трещин и прогиба

при контрольных нагрузках. Кроме того, определяют отклонения и погрешности этих характеристик. Сравнение производится в табличной форме, по аналогии с таблицей 3.1.

Следует иметь в виду, что из-за несовершенства методики расчета прочности и трещиностойкости наклонных сечений расхождение между теоретическими и экспериментальными данными может оказаться довольно большим.

В выводах по работе необходимо отразить: вид, характер и случай разрушения, особенности деформирования и трещинообразования при нагружении, запасы прочности, жесткости и трещиностойкости, величины прогиба и ширины раскрытия трещин при разрушении и другие характерные особенности поведения опытной балки при нагружении.

Вопросы для самопроверки

1. Причины появления наклонных трещин. На каких участках лабораторной балки возможно их появление?
2. Чем воспринимается поперечная сила в наклонных сечениях?
3. Случаи разрушения изгибаемых элементов по наклонным сечениям и особенности.
4. Почему $R_{sw} < R_s$ и на какую величину?
5. Из каких условий назначается шаг хомутов?
6. На действие какого усилия рассчитывается прочность наклонных сечений?
7. Основные конструктивные требования, обеспечивающие прочность наклонных сечений по изгибающему моменту.
8. Нарисуйте по памяти диаграммы $\sigma - \varepsilon$ для сжатого бетона, растянутой арматуры и график $P - f$ для балки.
9. Каковы характерные особенности разрушения элементов по наклонным сечениям и отличия от разрушения по нормальным сечениям?
10. Каковы условия, предотвращающие разрушение наклонных сечений от действия главных сжимающих напряжений?
11. При каком условии хомуты по расчету не требуются?
12. Какое армирование более эффективно: хомутами или отгибами и почему?

13. Учитывается ли при расчете прочности наклонных сечений наличие продольной сжимающей или растягивающей силы?

14. Влияет ли наличие нормальных трещин в опорной части балки на прочность наклонных сечений и почему?

* Кроме указанных вопросов, необходимо знать формулы для расчета наклонных сечений по прочности, образованию трещин, их раскрытию и деформациям, а также принятые в них условные обозначения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИСПЫТАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ НА ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ С БОЛЬШИМ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОМ

5.1 Цель работы

1. Получить наглядное представление о характере развития напряжений и деформаций во внецентренно сжатой колонне при нагружении вплоть до разрушения.

2. Установить экспериментальные значения усилий трещинообразования, разрушающих усилий, прогибов и ширины раскрытия трещин при контрольных нагрузках, а также величины деформаций в бетоне и арматуре.

3. Вычислить теоретические значения этих величин. Сопоставить с опытными данными, дать анализ полученных результатов и сделать выводы по работе в целом.

5.2 Особенности напряженно-деформированного состояния в железобетонном элементе при внецентренном сжатии

Внецентренно сжатые элементы испытывают на одновременное действие изгибающего момента и продольной сжимающей силы. При таком сочетании усилий распределяются напряжения на площадках, нормальных к продольной оси элемента, что в итоге приводит к разрушению по нормальному сечению.

В зависимости от величины эксцентриситета приложения продольной сжимающей нагрузки различают два случая внецентренного сжатия.

Случай 1 (случай больших эксцентриситетов). По характеру напряженное состояние внецентренно сжатого элемента приближается к изгибу, и его предельное состояние определяется достижением предела текучести в растянутой арматуре. При развитии больших пластических деформаций в арматуре происходит интенсивный рост нормальных трещин и уменьшение высоты сжатой зоны бетона. Это приводит к росту напряжений в сжатом бетоне и, когда они достигают предела прочности при сжатии, происходит разрушение сжатого бетона и самого внецентренно сжатого элемента.

По характеру разрушение является пластическим и наблюдается при постоянных или незначительно возрастающих нагрузках с развитием больших деформаций элемента и нормальных трещин значительной ширины раскрытия.

Случай 2 (случай малых эксцентриситетов). Напряженное состояние элемента становится неопределенным: эпюра напряжений может быть однозначной или двузначной, но всегда растянутая (или менее сжатая) арматура является недонапряженной, т.е. в ней в стадии разрушения напряжения не достигают предела текучести. Работа элемента приближается к центральному сжатию и его предельное состояние определяется достижением предела прочности сжатого бетона.

Разрушение элементов по случаю 2 происходит при возрастающей нагрузке, по характеру оно является хрупким. В стадии разрушения прогибы элемента невелики, трещины в растянутой (или менее сжатой) зоне отсутствуют.

В данной лабораторной работе предусмотрено испытание и разрушение внецентренно сжатого элемента по случаю 1.

Граница между случаем 1 и 2 внецентренного сжатия: при $\xi \leq \xi_R$ – случай 1; при $\xi > \xi_R$ – случай 2.

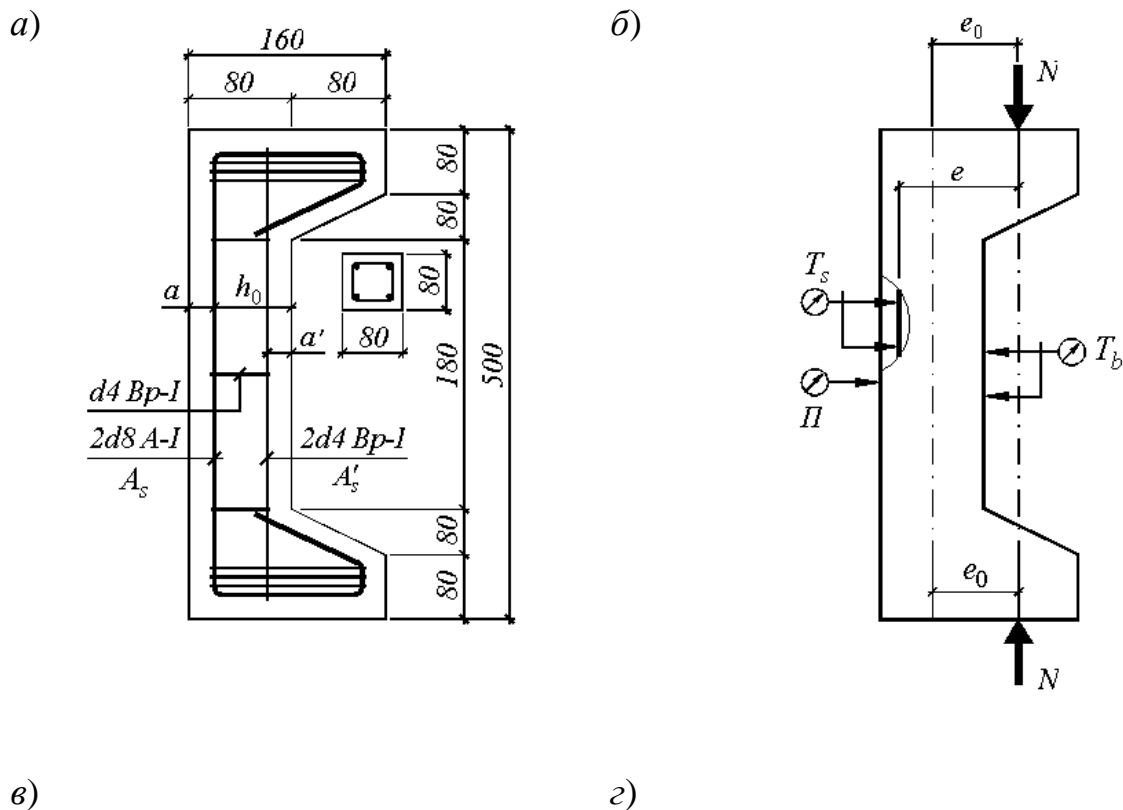
В гибких внецентренно сжатых элементах наступление предельного состояния возможно не только из-за потери прочности, но и потери устойчивости. При этом заметную роль играют случайные эксцентриситеты, которые должны учитываться расчетом. Опытный образец, подготовленный для испытаний, является достаточно устойчивым, т.е. $\ell_0 / h < 20$, поэтому влияние случайных эксцентриситетов

может не учитываться. По этой же причине коэффициент продольного изгиба при внецентренном сжатии $\varphi = 1$.

5.3 Исходные данные о железобетонной колонне

Геометрические размеры колонны определяют путем непосредственных измерений. Диаметр, класс и размещение арматуры устанавливают после испытания образца. В журнале лабораторных работ выполняют конструктивный чертеж колонны, пример оформления которого приведен на рисунок 5.1.

По результатам испытания бетонного куба с помощью формул (3.1) – (3.4) определяют предельные сопротивления бетона осевому сжатию и растяжению, а также начальный модуль упругости бетона. Данные об арматурной стали: нормативное сопротивление растяжению $R_s = 235 \text{ МПа}$, модуль упругости $E_s = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Работа сжатой арматуры не учитывается, так как хомуты устанавливают редко ($s > 20d$). Сведения о материалах заносят в журнал испытаний.



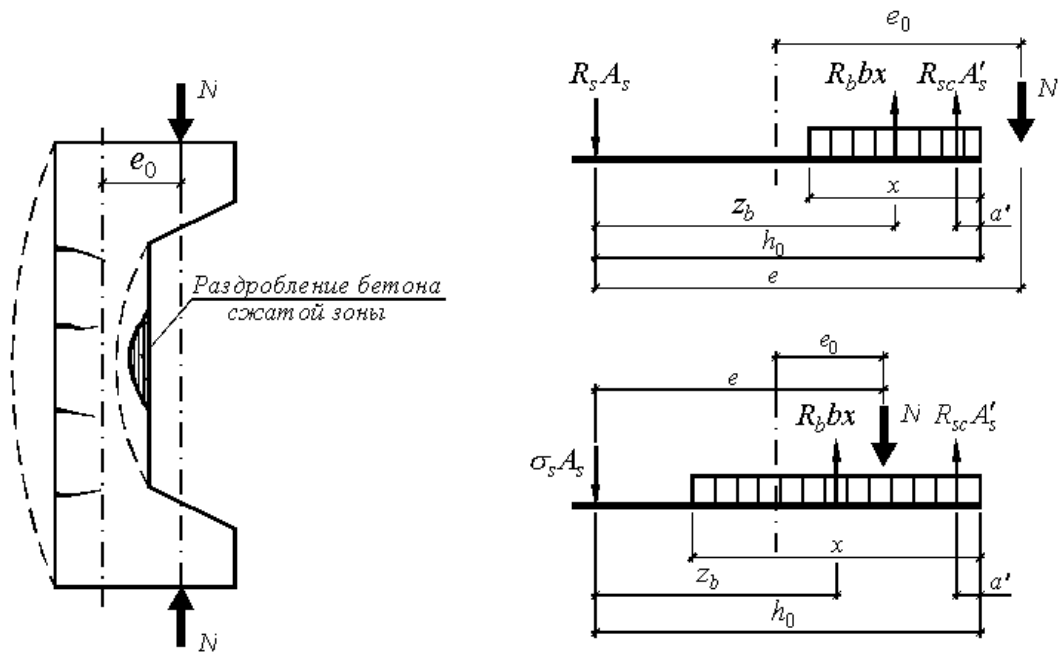


Рисунок 5.1 – Основные характеристики внецентренно нагруженного опытного образца:

a – размеры и армирование; *б* – схема нагружения и расстановки приборов;
в – характер разрушения; *г* – случаи разрушения

В журнале так же выполняют рисунки, на которых приводят схемы нагружения и расположения приборов. Тензометры T_s и T_b служат для замеров деформаций соответственно в растянутой арматуре и сжатом бетоне, индикатор Π устанавливают для определения прогибов колонны в средней части по ее высоте.

В журнале помещают рисунок колонны с изображением характерных трещин в стадии разрушения.

5.4 Испытание колонны

В начале испытаний проводят пробное нагружение для проверки работы приборов с последующей разгрузкой. Затем осуществляют ступенчатое нагружение образца с выдержкой на каждом этапе и снятием отсчетов по контрольно-измерительным приборам и записью их показаний в журнал. Степень нагрузки не должна превышать 10% от предполагаемой разрушающей.

При испытании колонны устанавливают и записывают в журнал те же контрольные параметры и характерные моменты испытаний, что и при испытании балок в лабораторных работах № 3 и № 4.

При нагрузке, составляющей 80% от разрушающей, снимают все контрольно-измерительные приборы во избежание их повреждения при разрушении колонны.

Разрушение колонны происходит более хрупко, чем балки. Поэтому перед ее разрушением необходимо отойти на безопасное расстояние, а в течение всего нагружения запрещается находиться в плоскости изгиба колонны.

После испытаний определяют и записывают в журнал недостающие сведения о колонне и общий вид ее разрушения.

5.5 Обработка опытных данных

Величину продольной сжимающей силы N определяют при испытании непосредственно на пульте управления пресса. Изгибающий момент на каждом этапе загрузки вычисляют как произведение продольной силы на опытный эксцентриситет, т.е.

$$M = e_0 N. \quad (5.1)$$

Данные об относительных деформациях сжатого бетона и растянутой арматуры получают на основании показаний соответствующих тензодатчиков с помощью формулы, аналогичной формуле (3.6). Прогобы колонны в середине ее высоты находят как разность показаний прогибомера на каждом этапе и нулевого отсчета, т.е. $f_i = \Pi_i - \Pi_0$. Высоту сжатой зоны бетона определяют так же, как и в балках.

Для наглядности характера развития деформаций по результатам обработки опытных данных в журнале лабораторных работ строят графики зависимостей $P - f$, $P - \varepsilon_s$, $P - \varepsilon_b$.

5.6 Теоретические расчеты колонны

В расчетах следует учитывать, что случайный эксцентриситет $e_a = 0$ и коэффициент продольного изгиба при внецентренном сжатии $\varphi = 1$. Кроме того, из-за редкого расположения хомутов ($s > 20d$) работа сжатой арматуры не учитывается.

Случай внецентренного сжатия может быть определен по приближенной зависимости: при $e_0 \geq 0,3h$ – разрушение происходит по случаю 1 (случай больших эксцентриситетов).

Несущая способность внецентренно сжатой колонны по случаю 1 (разрушающая продольная сила при известном эксцентриситете e_0):

$$N = \frac{R_b b x (h_0 - 0,5x)}{e_0 + 0,5h - a}; \quad (5.2)$$

$$x = \frac{N_{ult,exp} + R_s A_s}{R_b b}, \quad (5.3)$$

где $N_{ult,exp}$ – опытное значение разрушающей нагрузки.

Продольное усилие, при котором появляются трещины:

$$N_{crc} = \frac{M_{crc}}{e_0 - \eta_y}; \quad (5.4)$$

$$\eta_y = 0,46 W_{pl} / A_{red}; \quad (5.5)$$

$$A_{red} = bh + \alpha A_s. \quad (5.6)$$

Значение M_{crc} и W_{pl} определяют по формулам (3.12) – (3.14). Ширину раскрытия трещин в колонне при контрольном [2] сжимающем усилии N_{con} по раскрытию трещин определяют по формуле (3.15), считая:

$$\sigma_s = R_s \frac{N_{con}}{N_{ult,exp}}. \quad (5.7)$$

Прогиб колонны в средней части ее высоты при контрольном усилии по деформациям N_{con} упрощенно может быть определен с использованием следующих формул:

$$f = \frac{1}{r} \frac{\ell^2}{8} \left[1 + 18 \left(\frac{h}{\ell} \right)^2 \right]; \quad (5.8)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{N_{con} e_0 - 0,14 b h^2 R_{bt}}{0,5 E_s A_s h_0^2}, \quad (5.9)$$

где h – высота сечения колонны;
 b – ширина сечения колонны;
 l – длина колонны.

Все результаты расчетов заносят в журнал лабораторных работ.

5.7 Сопоставление теоретических и экспериментальных данных, выводы по работе

Сопоставление данных выполняют в табличной форме. Необходимо сравнить численные значения следующих теоретических и экспериментальных контрольных характеристик: разрушающей продольной силы; максимального усилия, при котором появились трещины; ширины раскрытия трещин и прогиба при контрольных нагрузках, а также отклонения теоретических значений от опытных, величины погрешностей.

В выводах должно быть отражено: случай и характер разрушения внецентренно сжатой колонны; вид трещин; особенности развития деформаций на всех этапах нагружения; запасы прочности, жесткости и трещиностойкости; ширина раскрытия трещин и величина относительного прогиба при разрушении и другие характерные моменты поведения внецентренно сжатой колонны в процессе нагружения.

Вопросы для самопроверки

1. Какие элементы называются внецентренно сжатыми? Приведите примеры.
2. По каким сечениям разрушаются внецентренно сжатые элементы и почему?
3. Особенности разрушения внецентренно сжатых элементов по случаям 1 и 2.
4. Продольное армирование внецентренно сжатых элементов: назначение; расстояние между стержнями; диаметр и класс арматуры; процент армирования (оптимальный, минимальный, максимальный).
5. Поперечное армирование внецентренно сжатых элементов; назначение хомутов; шаг; диаметр и класс арматуры.
6. Примеры армирования прямоугольных, тавровых, двутавровых, коробчатых, круглых и кольцевых сечений внецентренно сжатых элементов.

7. Как определяется граница между случаями 1 и 2 внецентренного сжатия?

8. Цель учета случайных эксцентриситетов и определение их величины.

9. Условия прочности внецентренно сжатых элементов, работающих по случаю 1 и 2.

10. Учет гибкости при внецентренном сжатии.

11. Особенности расчета внецентренно сжатых элементов таврового и двутаврового профилей.

12. Нарисуйте по памяти диаграммы деформаций в сжатом бетоне, растянутой арматуре и прогибов элемента в зависимости от величины нагрузки.

13. Какое армирование называется косвенным и когда оно применяется?

14. Почему расчетное сопротивление арматуры сжатию принимается не выше 400 МПа?

Кроме того, необходимо знать расчетные формулы для определения несущей способности, усилия образования трещин и ширины их раскрытия, а также прогибов и принятые в них обозначения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ БАЛКИ В ПРОЦЕССЕ НАГРУЖЕНИЯ

6.1 Цель работы

1. Получить сравнительные характеристики жесткости и трещиностойкости при нагружении балок с предварительным напряжением арматуры и без предварительного напряжения с одинаковыми геометрическими и прочностными характеристиками.

2. Установить экспериментальные значения ширины раскрытия трещин и прогибов этих балок при контрольных нагрузках, а также величины деформаций бетона и арматуры.

3. Вычислить теоретические значения прогибов и ширины раскрытия трещин, сравнить с опытными данными, дать анализ полученных результатов и сделать выводы по работе в целом.

6.2 Цель предварительного напряжения железобетонных элементов и особенности их поведения под нагрузкой

Одним из существенных недостатков железобетонных конструкций с трещинами является их работа под нагрузкой. Применение в качестве арматуры экономичных высокопрочных сталей в значительной мере снижает трещиностойкость конструкций и увеличивает их деформативность. В этом случае предельное состояние железобетонных конструкций определяют жесткостью и трещиностойкостью, а прочностные свойства сталей могут быть недоиспользованы.

Поэтому в растянутой зоне конструкций до приложения эксплуатационных нагрузок искусственно создается предварительное обжатие бетона путем натяжения арматуры.

Предварительное напряжение, кроме повышения жесткости и трещиностойкости конструкций, позволяет эффективно применять высокопрочные материалы, а следовательно, и снижать их расход, стоимость и вес конструкций. Предварительно напряженные конструкции по сравнению с обычными более долговечны, выносливы, расширяют область применения железобетона.

Последовательность развития напряжений в предварительно напряженном изгибаемом элементе можно проследить на балке с арматурой, напрягаемой на упоры (рисунок 6.1):

а) арматура уложена в форму, и в ней созданы начальные контролируемые напряжения: σ_{sp} – в растянутой зоне и σ'_{sp} – в сжатой;

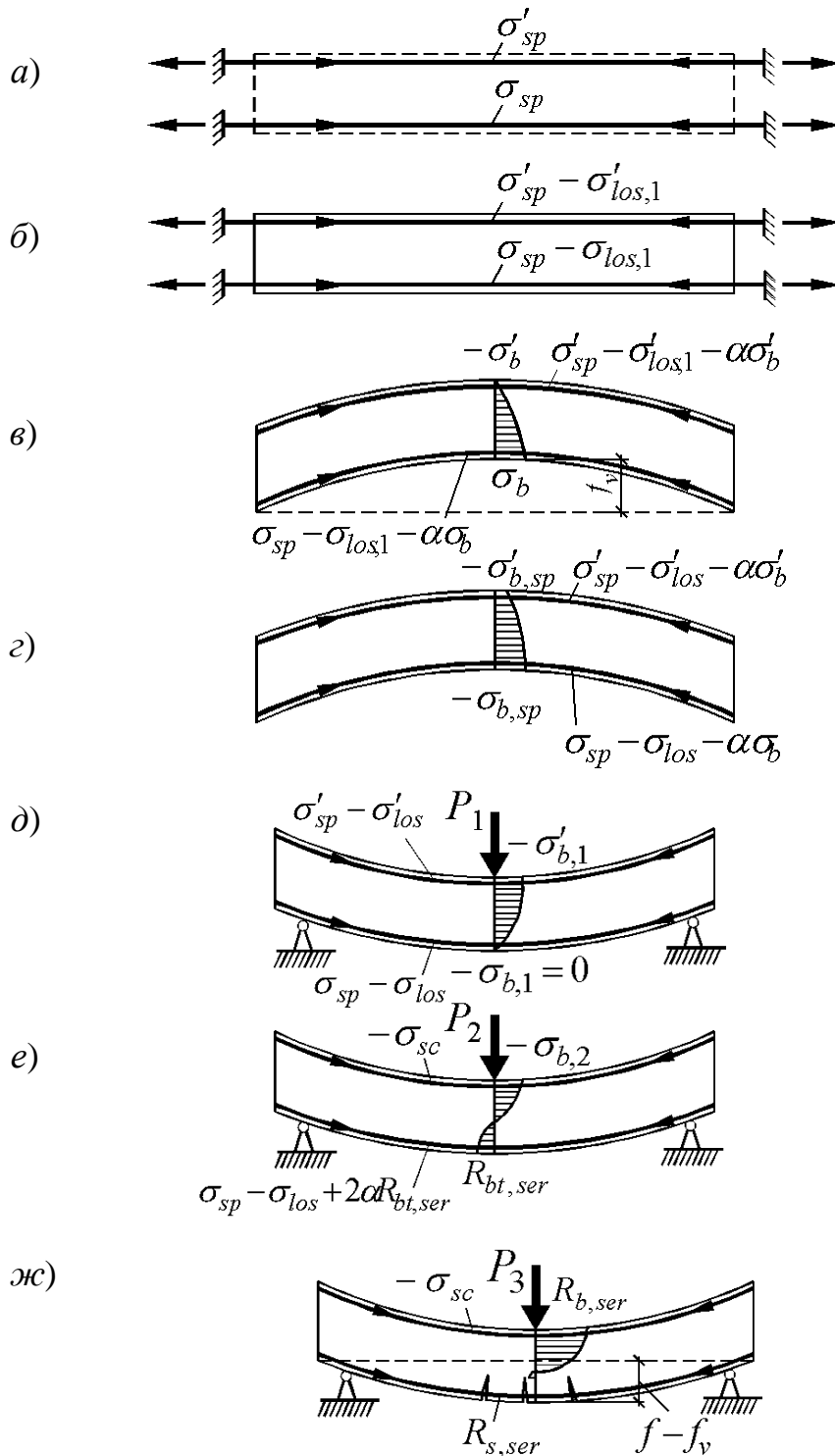


Рисунок 6.1 – Последовательность развития напряженного состояния в предварительно напряженной железобетонной балке

б) элемент забетонирован, в арматуре наблюдаются первые потери $\sigma_{los,1}$ и $\sigma'_{los,1}$;

в) арматура освобождена с упоров и, стремясь восстановить первоначальное положение, обжимает бетон. Напряжения в арматуре снижаются на величину $\alpha\sigma_b$ за счет обжатия бетона. Из-за разной ве-

личины усилий предварительных напряжений в растянутой и сжатой арматуре, конструкция получает выгиб f_v ;

з) с течением времени в арматуре происходят вторые потери $\sigma_{los,2}$, сумма которых с первыми равна полному σ_{los} (в ненапрягаемых элементах в этой стадии напряжения в арматуре и бетоне равны нулю);

д) при загрузении элемента внешней нагрузкой сжимающие напряжения в бетоне растянутой зоны постепенно погашаются до нуля. Напряжения в растянутой арматуре, соответствующие этой стадии, равны $(\sigma_{sp} - \sigma_{los})$;

е) с увеличением нагрузки напряжения в бетоне растянутой зоны достигают предела прочности на растяжение $R_{bt,ser}$. В этой стадии напряжения в растянутой арматуре равны $(\sigma_{sp} - \sigma_{los} + 2\alpha R_{bt,ser})$, в ненапряженных элементах равны $(2\alpha R_{bt})$;

ж) с появлением трещин напряжения в растянутой зоне воспринимаются только арматурой. В стадии III напряжения в растянутой арматуре равны $R_s(\sigma_v)$, в сжатом бетоне – R_b (такая же величина напряжений будет и в ненапрягаемых элементах).

На основании этого анализа можно сделать следующие выводы:

1. В стадии разрушения прочность предварительно напряженных элементов, как и ненапряженных, определяется только пределом текучести растянутой арматуры, т.е. предварительное напряжение не влияет на прочность элемента.

2. Предварительное напряжение повышает трещиностойкость элементов: образование трещин в напрягаемых элементах происходит при напряжениях в растянутой арматуре бо́льших на величину $(\sigma_{sp} - \sigma_{los})$, чем у ненапрягаемых.

3. Предварительное напряжение снижает деформации элементов на величину выгибов от усилий предварительного обжатия.

6.3 Исходные данные для опытной балки

Лабораторная работа № 6 носит демонстрационный характер и выполняется без разрушения образцов. Кроме того, сравнительные характеристики при нагружении напрягаемых и ненапрягаемых эле-

ментов устанавливают из испытания одного образца. Поэтому опытная балка изготовлена таким образом, что образец может быть испытан как с предварительным напряжением, так и без него (рисунок 6.2). Для этого в балке в нижней части оставлен паз, в котором находится предварительно напрягаемый стержень. Регулирование усилия в стержне осуществляется с помощью гаек по его концам. Для распределения усилий предварительного напряжения на бетон на концах балки установлены анкера из стальных уголков.

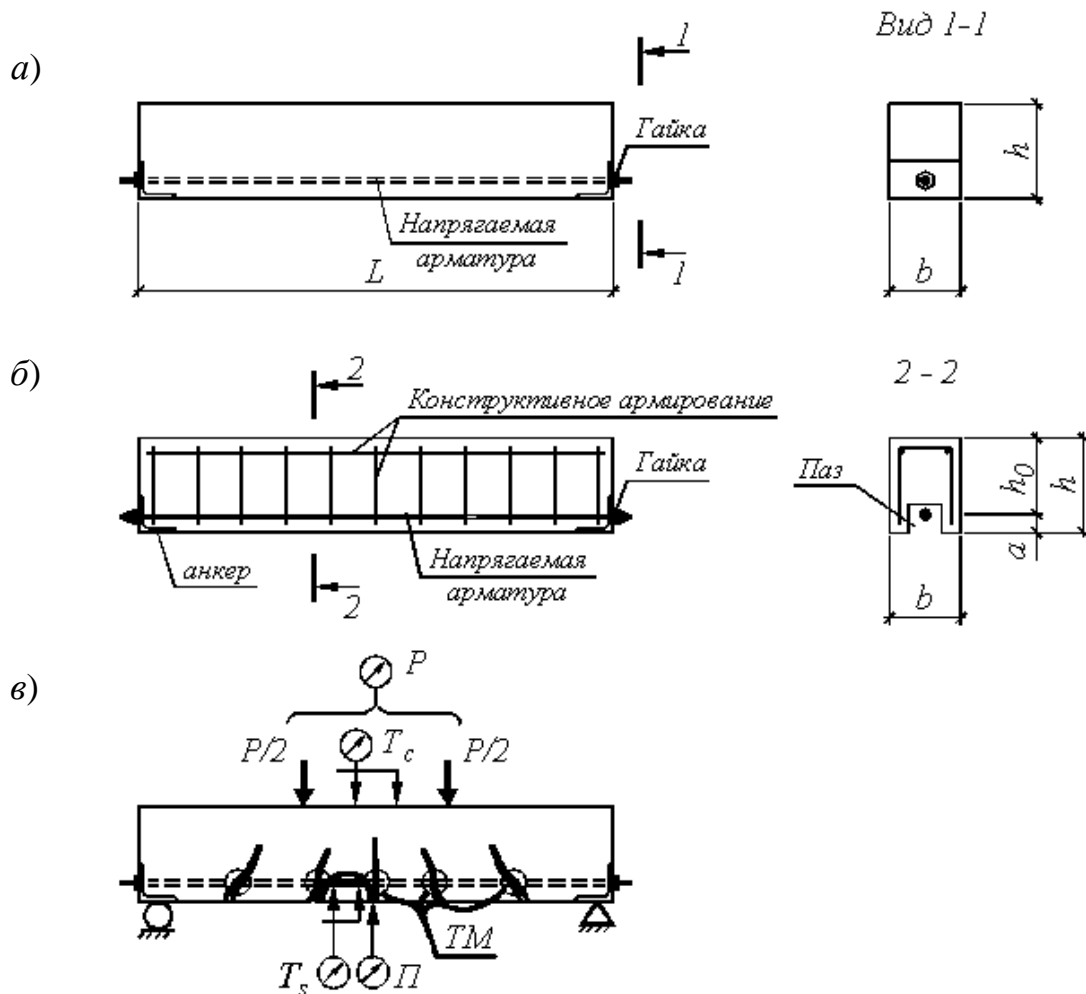


Рисунок 6.2 – Общий вид (а), армирование и размеры элемента (б), схема расположения приборов (в)

Все остальное армирование балки является конструктивным и служит для восприятия напряжений от усадки бетона, предварительного обжатия и случайных механических воздействий.

Данные о размерах балки, ее армировании, схеме испытаний и расположении приборов получают на основе обмеров до или после

испытаний. Сведения о материалах устанавливают по результатам их испытаний с помощью формул (3.1) – (3.4). Для выполнения данной лабораторной работы необходимы следующие характеристики бетона и арматуры: размеры сечений (b и h для балки и d_s для арматуры), нормативные сопротивления растяжению, модули деформаций, а также величина предварительного напряжения арматуры.

При испытании балки для определения основных контрольных характеристик устанавливают приборы: тензометр T_t – для контроля деформаций растянутой арматуры и определения величины предварительного напряжения; тензометр T_c – для контроля деформаций сжатого бетона, прогибомер Π – для определения прогибов в середине балки, трещиномер TM – для определения ширины раскрытия трещин.

Все исходные данные заносят в журнал лабораторных работ.

6.4 Испытание балки

Испытание балки проводят в два этапа: в начале без предварительного напряжения, затем с напряженной растянутой арматурой (рисунок 6.3).

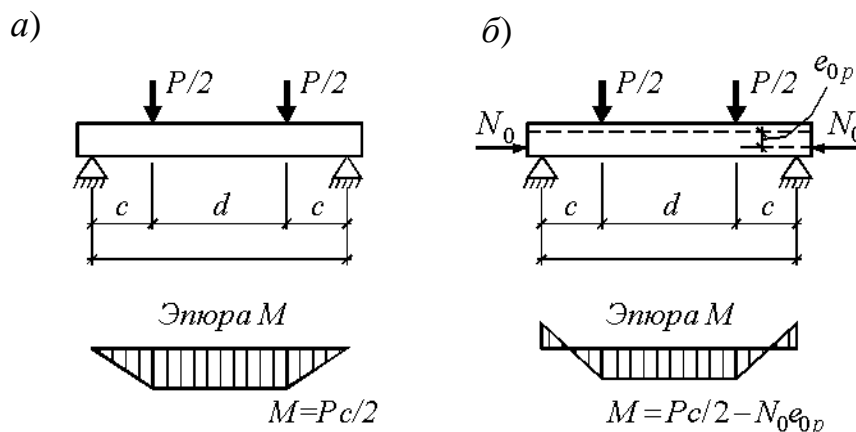


Рисунок 6.3 – Схемы испытаний балок:
а – обычной; б – предварительно напряженной

При испытании балки без предварительного напряжения доводят гайки на концах рабочего арматурного стержня только до плотного упора с уголком. Затем производят пробное нагружение балки и разгрузку, снимают нулевые отсчеты контрольно-измерительных прибо-

ров. Дальнейшее нагружение балки производят ступенчато, при выдержке под постоянной нагрузкой, на каждой ступени фиксируют и записывают в журнал показания приборов. Особое внимание должно быть уделено определению прогибов и ширины раскрытия трещин.

Величина нагрузки в пределах одной ступени не должна превышать 10% от разрушающей. Испытание заканчивают на 6...8 ступени, после чего производится полная разгрузка.

В разгруженном состоянии выполняют предварительное напряжение рабочей продольной арматуры посредством натяжения гаек по торцам арматурного стержня. Величину начального контролируемого напряжения в арматуре σ_{sp} назначают в пределах $(0,4...0,7)R_{s,ser}$ и определяют по показаниям тензометра T_t :

$$\sigma_{sp} = \frac{T_i - T_0}{S} \cdot E_s, \quad (6.1)$$

где $(T_i - T_0)$ – приращение показания тензометра в процессе предварительного напряжения;

S – база тензометра;

E_s – модуль деформации арматуры.

Во время предварительного напряжения арматуры прогибмером Π определяют выгиб f_v , и деформации в сжатом бетоне тензомером T_c . Затем производят ступенчатое нагружение балки по той же методике, что и без предварительного напряжения с записью показаний приборов. Особое внимание необходимо уделить соблюдению режима испытаний: он должен в точности повторять режим испытания балки без предварительного напряжения.

6.5 Обработка опытных данных

При обработке данных необходимо определить значения контрольных параметров в балке с предварительным напряжением арматуры и без него.

Относительные удлинения сжатого бетона и растянутой арматуры в процессе предварительного напряжения получают из показаний тен-

зометров на каждом этапе загрузки по методике, изложенной в описании лабораторной работы № 3.

Прогибы балки без предварительного напряжения получают вычитанием нулевого отсчета по прогибомеру Π_0 из его показаний на каждом этапе загрузки Π_i , т.е. $f_i = \Pi_i - \Pi_0$. В балке с предварительным напряжением прогибы будут меньше на величину выгиба f_v от предварительного обжатия напрягаемой арматурой:

$$f_{sp,i} = \Pi_i - \Pi_0 - f_v. \quad (6.2)$$

Величину нагрузки P и ширину раскрытия трещин a_{crc} получают непосредственно при испытании в требуемых размерностях, которые обработке не нуждаются.

В журнале лабораторных работ строят диаграммы $P - f$ и $P - a_{crc}$, причем для большей наглядности и подтверждения цели предварительного напряжения однотипные диаграммы для напряженной и ненапряженной балки нужно построить на одном графике.

6.6 Теоретические расчеты балки

При расчетах необходимо учесть, что в виду особых условий преднапряжения и загрузки балки, потери предварительного напряжения не велики и условно могут быть приняты равными нулю.

Основными контрольными параметрами в данной лабораторной работе являются: ширина раскрытия трещин и прогибы в середине пролета балки.

Ширина раскрытия трещин при значении изгибающего момента M может быть упрощенно определена по эмпирической формуле:

$$a_{crc} = 20(3,5 - 100\mu) \frac{\sigma_s}{E_s} \sqrt[3]{d_s}, \quad (6.3)$$

где μ – коэффициент армирования поперечного сечения балки;

$\sigma_s = M / (0,9A_s h_0)$ – напряжения в растянутой арматуре в балке без предварительного напряжения;

$\sigma_s = M / (0,9A_s h_0) - \sigma_{sp}$ – напряжения в растянутой арматуре в балке с предварительным напряжением.

Прогибы балки без предварительного напряжения f могут определяться по формуле (3.18). В предварительно напряженной балке прогиб f_{sp} будет меньше на величину выгиба от предварительного обжатия, т.е.

$$f_{sp} = f - f_v, \quad (6.4)$$

где f_v – экспериментальное значение выгиба.

Расчеты заносят в журнал лабораторных работ.

6.7 Сопоставление теоретических и экспериментальных данных, выводы по работе

При сопоставлении полученных данных необходимо сравнить теоретические и экспериментальные значения ширины раскрытия трещин и прогибов в балке при ее испытании с предварительным напряжением арматуры и без него (таблица 6.1).

В выводах по работе необходимо отметить: влияние предварительного напряжения на жесткость и трещиностойкость конструкции, его величину для опытного образца в процентах для опытной балки; характер трещин; абсолютные значения ширины их раскрытия и прогибов в балке с обычной и напрягаемой арматурой, а также другие характерные моменты испытаний.

Таблица 6.1 – Журнал испытаний железобетонных балок

Показатели	Контрольные характеристики			
	a_{crc}	$a_{crc,sp}$	f	f_{sp}
Опытные значения A_{exp}				
Расчетные значения A_{calc}				
Отклонения $\pm \delta = A_{exp} - A_{calc}$				
Погрешность $(\pm \delta / A_{exp}) \cdot 100\%$				
$\Delta a_{crc} = a_{crc} - a_{crc,sp}$				
$\Delta f = f - f_{sp}$				
То же (%)				

Вопросы для самопроверки

1. Какова цель предварительного напряжения?
2. Способы создания предварительного напряжения. Как производится «самонапряжение»?
3. Преимущества и недостатки предварительно напряженных железобетонных конструкций.
4. Арматура и бетон, рекомендуемые СНиП для предварительно напряженных конструкций.
5. Анкеровка предварительно напряженной арматуры и армирование конструкций в зоне анкеровки.
6. Потери предварительного напряжения.
7. Почему предварительное напряжение не влияет на прочность железобетонных элементов?
8. Как регулируется жесткость и трещиностойкость железобетонных конструкций?
9. Почему предварительное напряжение арматуры классов А-I, А-II, А-III, В-I и Вр-I неэффективно?
10. Категории трещиностойкости железобетонных конструкций.
11. В каких пределах назначается величина предварительного напряжения?
12. Как учитывается величина предварительного напряжения при расчете конструкций в стадиях изготовления, транспортировки и монтажа.
14. Влияет ли предварительное напряжение на прочность, устойчивость и жесткость сжатых элементов? Если да, то как?

Необходимо также знать расчетные формулы, используемые в данной лабораторной работе и принятые в них обозначения.

В соответствии с методикой испытаний, изложенной в настоящих методических указаниях, разработаны демонстрационные программы для студентов по лабораторным работам № 3 – № 6, позволяющие обеспечить более доступное изучение материала. Основные результаты, визуально отображаемые указанными демонстрационными программами, приведены в приложении.

Для подготовки к отчету лабораторных работ могут быть использованы источники [4, 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: ЦИТП Госстроя России, 2001.
2. ГОСТ 8829-94. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. – М., 1998.
3. Рекомендации по методике определения параметров, характеризующих свойства различных бетонов при расчете прочности нормальных сечений стержневых железобетонных элементов. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1984.
4. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – М.: Стройиздат, 1991.
5. Железобетонные и каменные конструкции / В.М. Бондаренко, Р.О. Бакиров, В.Г. Назаренко и др.; под ред. В.М. Бондаренко. – М.: Высшая школа, 2004.

ПРИЛОЖЕНИЕ

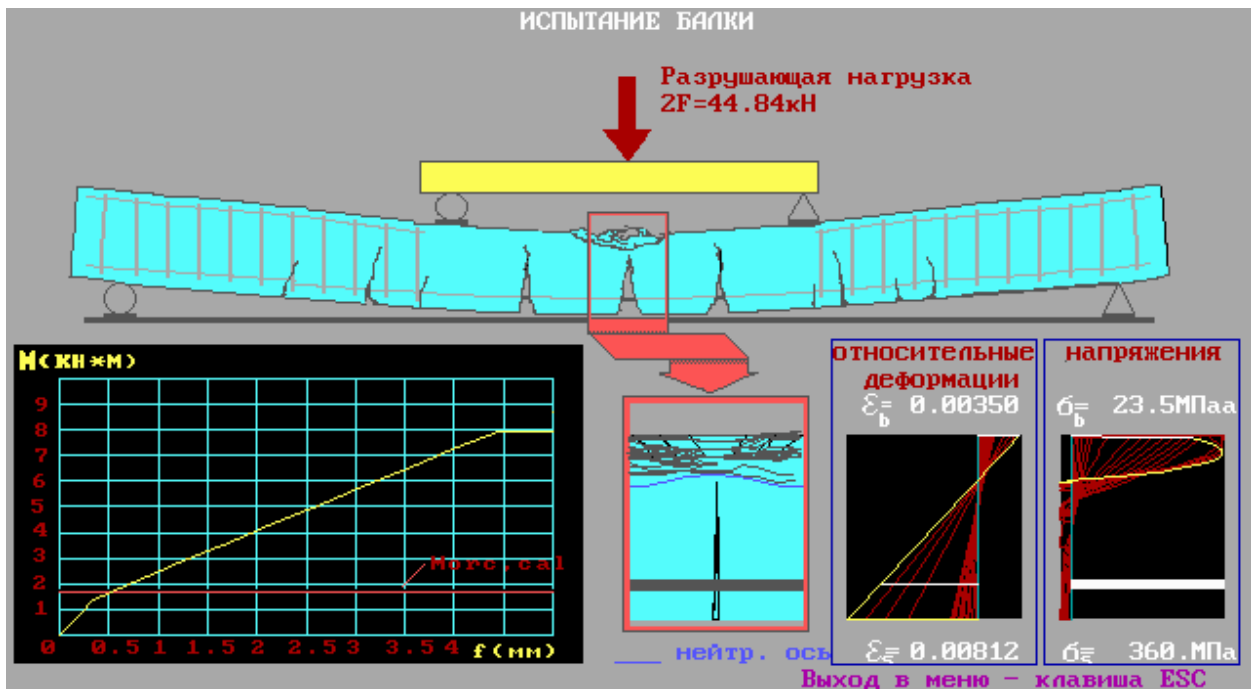


Рисунок П.1 – Демонстрационная программа испытаний
«Лабораторная работа № 3»

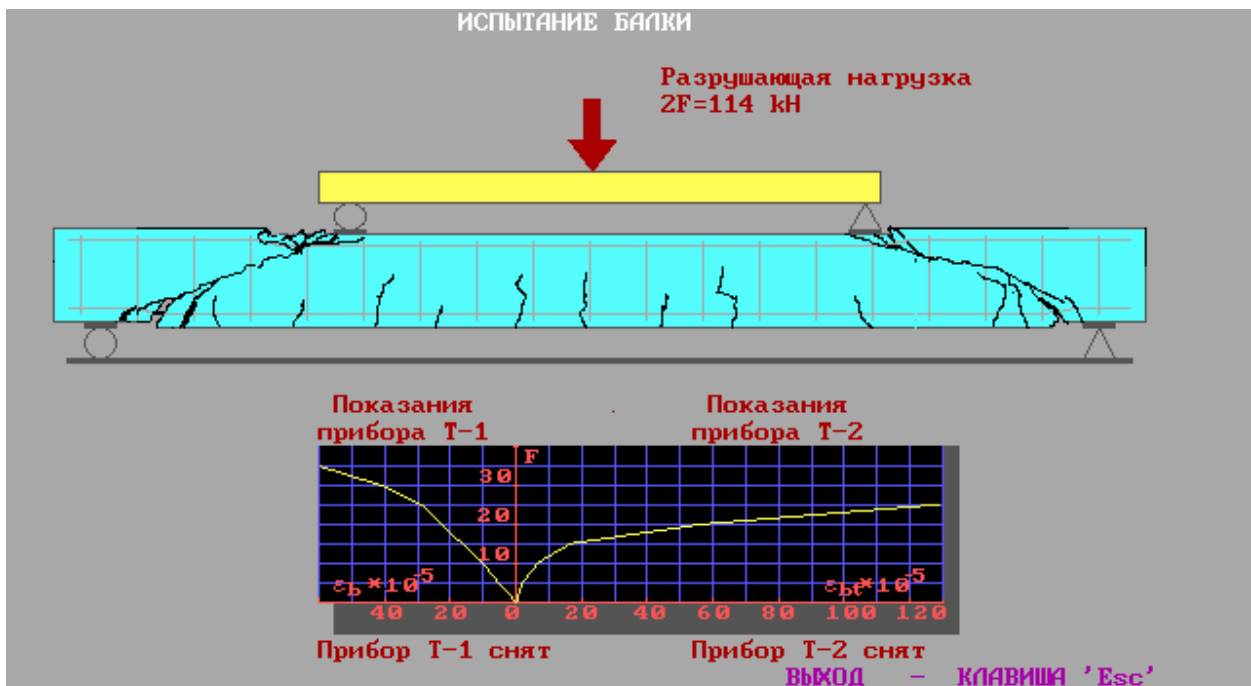


Рисунок П.2 – Демонстрационная программа испытаний
«Лабораторная работа № 4»

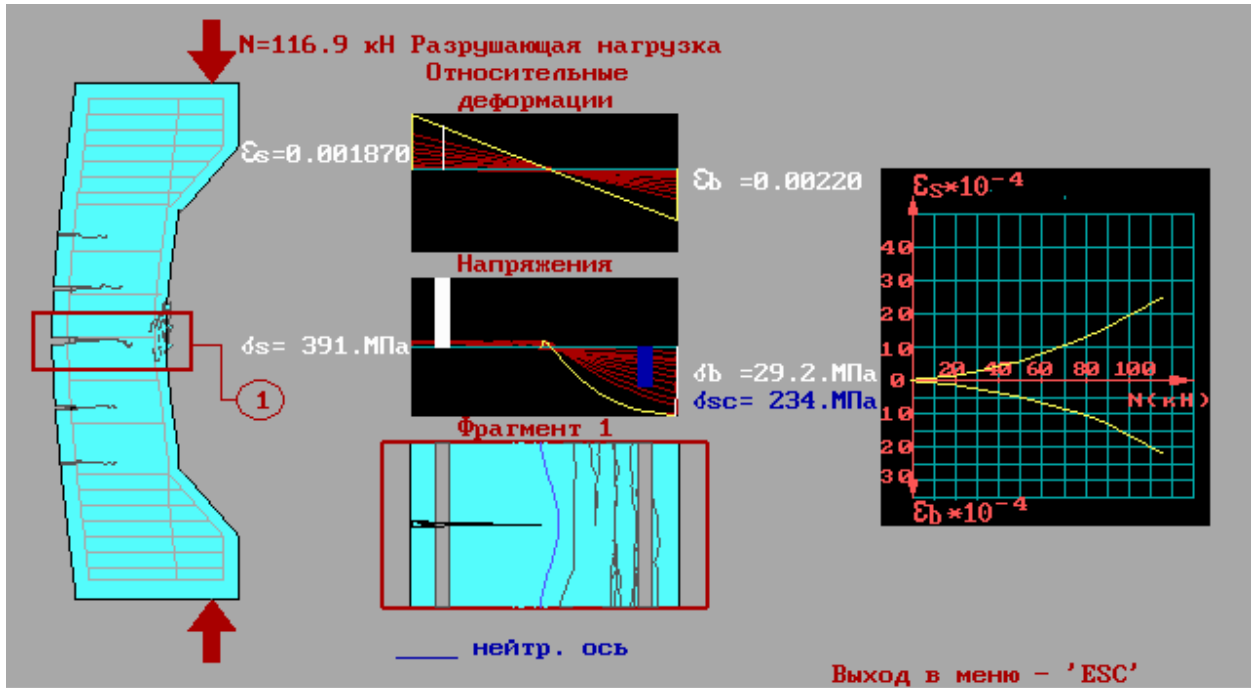


Рисунок П.3 – Демонстрационная программа испытаний
«Лабораторная работа № 5»

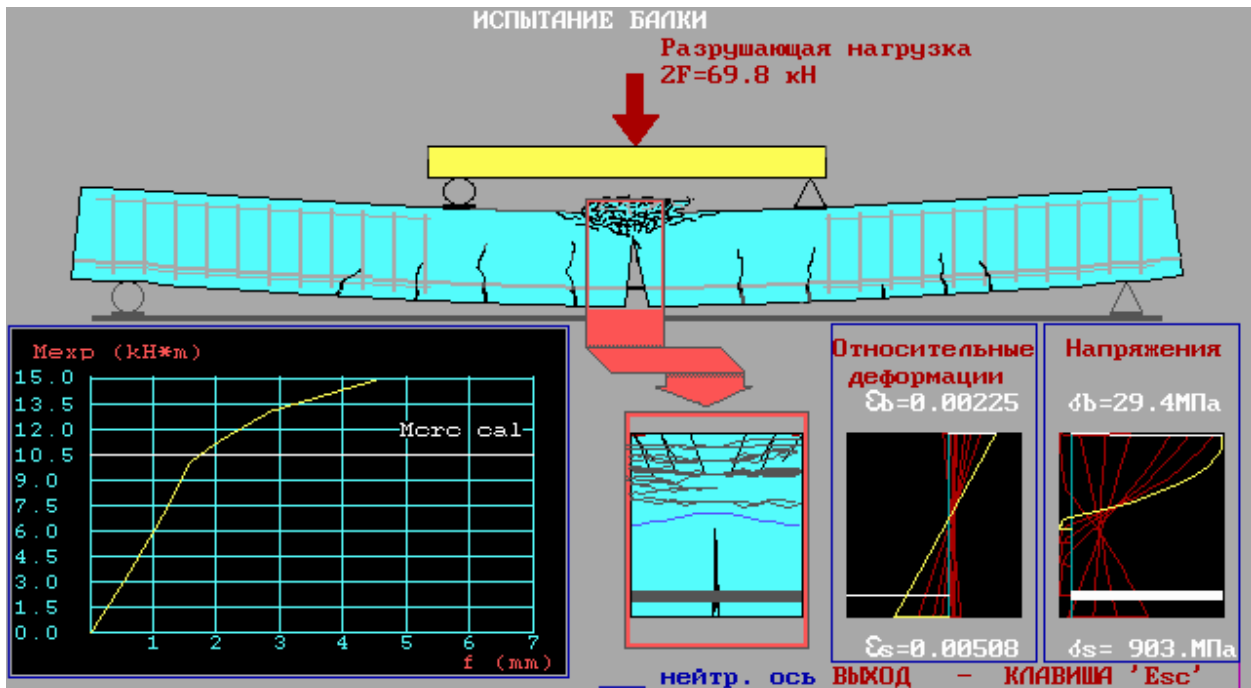


Рисунок П.4 – Демонстрационная программа испытаний
«Лабораторная работа № 6»