

## Лабораторная работа №1: Испытание железобетонной балки на изгиб с разрушением по нормальному сечению

### Порядок выполнения работы:

1. Определение расчетных характеристик бетона на момент испытания
2. Определение расчетных характеристик арматуры
3. Геометрические размеры и схема армирования балки
4. Определение характеристик приведенного сечения
5. Определение теоретического момента трещинообразования
6. Определение теоретического разрушающего момента
7. Схема загрузки балки
8. Испытание балки
9. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений
10. Установление опытного момента трещинообразования и сравнение его с теоретическим значением
11. Установление опытного разрушающего момента и сравнение его с теоретическим значением
12. Определение максимального прогиба балки под нагрузкой

### Цель лабораторной работы



ружения, т.е. на стадии упругой

Целью лабораторной работы является изучение напряженно-деформированного состояния нормального сечения изгибаемого элемента на различных стадиях загрузки, т.е. на стадии упругой работы балки, в стадии развития трещин в бетоне и в стадии разрушения. Демонстрируемый видеоряд знакомит с операциями при натурном опыте.

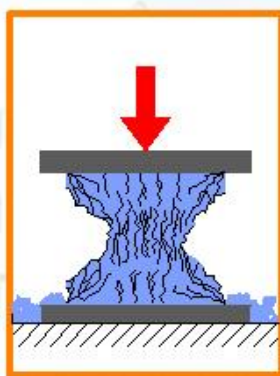
## Определение расчетных характеристик бетона на момент испытания



Для проведения натурных испытаний изготовлена балка прямоугольного сечения шириной 10 см и высотой 15 см. Поперечная арматура по длине балки поставлена неравномерно: в крайних третях пролета чаще, а в середине – реже. Конструкция способствует преимущественному разрушению балки по нормальному сечению.

## Определение расчетных характеристик бетона на момент испытания

Определение кубиковой прочности бетона по испытаниям кубов с ребром 15 см



$$R_1 = 39,9 \text{ Н/мм}^2$$

$$R_2 = 38,7 \text{ Н/мм}^2$$

$$R_3 = 39,2 \text{ Н/мм}^2$$

Среднее значение кубиковой прочности бетона по результатам испытания кубов:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} = \frac{39,9 + 38,7 + 39,2}{3} = 39,3 \text{ Н/мм}^2$$

Призменная прочность бетона, отвечающая средней кубиковой прочности:

$$R_b = (0,77 - 0,00125\bar{R})\bar{R} = (0,77 - 0,00125 \cdot 39,3) \cdot 39,3 = 28,3 \text{ Н/мм}^2$$

Прочность бетона при осевом растяжении, отвечающая средней кубиковой прочности:

$$R_{bt} = \frac{5\bar{R}}{45 + \bar{R}} = \frac{5 \cdot 39,3}{45 + 39,3} = 2,3 \text{ Н/мм}^2$$

Начальный модуль упругости бетона, отвечающий средней кубиковой прочности:

$$E_b = \frac{55000\bar{R}}{27 + \bar{R}} = \frac{55000 \cdot 39,3}{27 + 39,3} = 32\,600 \text{ Н/мм}^2$$

## Определение расчетных характеристик арматуры

Определение сопротивления растяжению стержневой арматуры класса А-III (диаметр 12 мм)

$$\sigma_{y1} = 368 \text{ Н/мм}^2$$

$$\sigma_{y2} = 368 \text{ Н/мм}^2$$

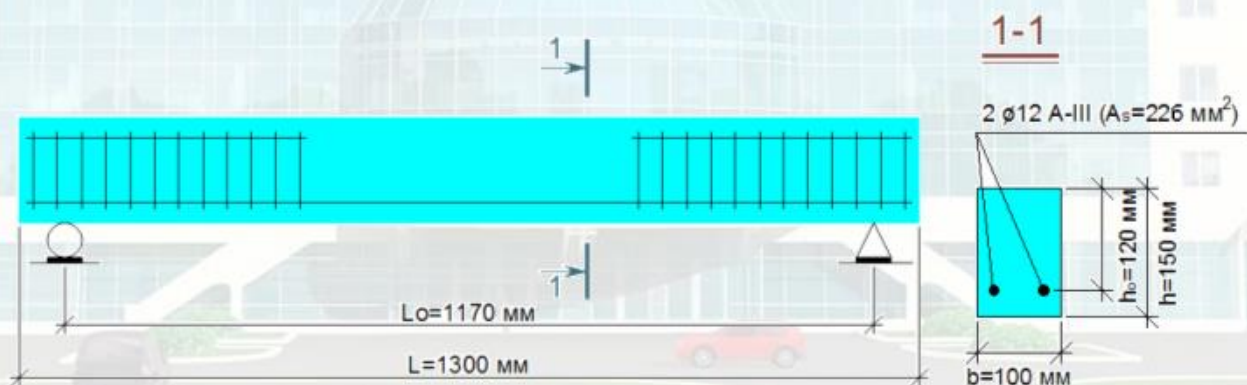
$$\sigma_{y3} = 357 \text{ Н/мм}^2$$

Расчетное сопротивление арматуры растяжению (среднее значение физического предела текучести):

$$R_s = \frac{\sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3}}{3} = \frac{368 + 368 + 357}{3} = 364 \text{ Н/мм}^2$$

## Геометрические размеры и схема армирования балки

Длина балки	$L = 1\,300$	мм
Расчетная длина балки	$L_o = 1\,170$	мм
Высота сечения	$h = 150$	мм
Рабочая высота сечения	$h_o = 120$	мм
Ширина сечения	$b = 100$	мм
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры $A_s$	$a = 31$	мм
Площадь сечения арматуры	$A_s = 226$	мм <sup>2</sup>
Модуль упругости бетона	$E_b = 32\,600$	Н/мм <sup>2</sup>
Модуль упругости ненапрягаемой арматуры	$E_s = 210\,000$	Н/мм <sup>2</sup>



## Геометрические размеры и схема армирования балки



В процессе нагружения балки индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм в середине пролета балки производятся измерения прогибов.

## Геометрические размеры и схема армирования балки



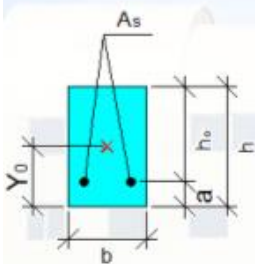
Деформации бетона на растянутой и сжатой гранях балки измеряются тензотрами Гугенбергера с базой 100 мм.

## Геометрические размеры и схема армирования балки



Деформация бетона по всей высоте сечения измеряется тензорезисторами с базой 50 мм, наклеенными в середине пролета на одной боковой грани, и регистрируются прибором "СИИТ".

## Определение характеристик приведенного сечения



Расчетная длина балки	$L_o = 1\ 170$	мм
Высота сечения	$h = 150$	мм
Рабочая высота сечения	$h_o = 120$	мм
Ширина сечения	$b = 100$	мм
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры $A_s$	$a = 31$	мм
Площадь сечения арматуры	$A_s = 226$	мм <sup>2</sup>
Модуль упругости бетона	$E_b = 32\ 600$	Н/мм <sup>2</sup>
Модуль упругости ненапрягаемой арматуры	$E_s = 210\ 000$	Н/мм <sup>2</sup>

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_b} = \frac{210000}{32600} = 6,44$$

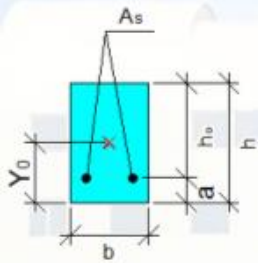
Площадь приведенного сечения:  $A_{red} = bh + \alpha_s A_s = 100 \cdot 150 + 6,44 \cdot 226 = 16\ 450$  мм<sup>2</sup>  
 Статический момент площади приведенного сечения относительно нижней грани:

$$S_{red} = \frac{bh^2}{2} + \alpha_s A_s a = \frac{100 \cdot 150^2}{2} + 6,44 \cdot 226 \cdot 31 = 1\ 170\ 000$$
 мм<sup>2</sup>

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до нижней грани:

$$Y_o = \frac{S_{red}}{A_{red}} = \frac{1170000}{16450} = 71,1$$
 мм

## Определение характеристик приведенного сечения



Расчетная длина балки	$L_0 = 1\,170$	мм
Высота сечения	$h = 150$	мм
Ширина сечения	$b = 100$	мм
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры $A_s$	$a = 31$	мм
Площадь сечения арматуры	$A_s = 226$	мм <sup>2</sup>
Модуль упругости бетона	$E_b = 32\,600$	Н/мм <sup>2</sup>
Модуль упругости ненапрягаемой арматуры	$E_s = 210\,000$	Н/мм <sup>2</sup>
Расстояние от центра тяжести приведенного сечения относительно нижней грани	$Y_0 = 71,1$	мм
Модуль упругости ненапрягаемой арматуры	$\alpha_s = 6,44$	

Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести сечения:

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh\left(Y_0 - \frac{h}{2}\right)^2 + \alpha_s A_s (Y_0 - a)^2 = \frac{100 \cdot 150^3}{12} + 100 \cdot 150 \left(71,1 - \frac{150}{2}\right)^2 + 6,44 \cdot 226 \cdot (71,1 - 31)^2 = 30\,690\,000 \text{ мм}^4$$

Момент сопротивления приведенного сечения относительно нижней грани:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{Y_0} = \frac{30\,690\,000}{71,1} = 431\,600 \text{ мм}^3$$

Упруго-пластический момент сопротивления относительно нижней грани:

$$W_{pl} = 1,75 W_{red} = 1,75 \cdot 431\,600 = 755\,300 \text{ мм}^3$$

## Определение теоретического момента трещинообразования

Упруго-пластический момент сопротивления относительно нижней грани:

$$W_{pl} = 755\,300 \text{ мм}^3$$

$$W_{pl} = 755,3 \text{ см}^3$$

Прочность бетона при осевом растяжении:

$$R_{bt} = 2,3 \text{ Н/мм}^2$$

$$R_{bt} = 23 \text{ кгс/см}^2$$

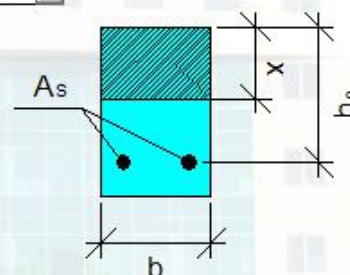
Теоретический момент образования трещин:

$$M_{cr,cal} = R_{bt} W_{pl} = 2,3 \cdot 755\,300 = 1\,737\,000 \text{ Н·мм}$$

$$M_{cr,cal} = 17\,370 \text{ кгс·см}$$

## Определение теоретического разрушающего момента

Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_s = 3710$	кгс/см <sup>2</sup>
Площадь поперечного сечения ненапрягаемой арматуры	$A_s = 2,26$	см <sup>2</sup>
Расчетное сопротивление бетона сжатию	$R_b = 288,5$	кгс/см <sup>2</sup>
Рабочая высота сечения	$h_o = 12$	см
Ширина сечения	$b = 10$	см



Высота сжатой зоны в стадии разрушения:

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b b} = \frac{3710 \cdot 2,26}{288,5 \cdot 10} = 2,91 \text{ см}$$

Теоретическое значение разрушающего момента:

$$M_{ul,cal} = R_b b x \left( h_o - \frac{x}{2} \right) = 288,5 \cdot 10 \cdot 2,91 \cdot \left( 12 - \frac{2,91}{2} \right) = 88\,520 \text{ кгс}\cdot\text{см}$$

## Схема загрузки балки

Расчетная длина балки	$L_o = 117$	см
Высота сечения	$h = 15$	см
Ширина сечения	$b = 10$	см
Теоретический момент образования трещин	$M_{crc,cal} = 17\,370$	кгс}\cdot\text{см}
Теоретическое значение разрушающего момента	$M_{ul,cal} = 88\,520$	кгс}\cdot\text{см}

Вес загрузочных устройств (траверсы и т.д.):  $P = 20$  кгс

Объемный вес балки (бетон):  $\gamma_b = 2500 \text{ кг} / \text{м}^3 = 0,0025 \text{ кгс} / \text{см}^3$

Собственный вес балки:  $G = b \cdot h \cdot \gamma_b \cdot l_0 = 10 \cdot 15 \cdot 0,0025 \cdot 117 = 43,9$  кгс

Момент от собственного веса балки:  $M_{c.в.} = \frac{G}{2} \cdot \frac{l_0}{4} = \frac{43,9}{2} \cdot \frac{117}{4} = 642$  кгс}\cdot\text{см}

Момент от веса траверсы:  $M_{mp} = \frac{P \cdot l_0}{2 \cdot 3} = \frac{20 \cdot 117}{2 \cdot 3} = 390$  кгс}\cdot\text{см}

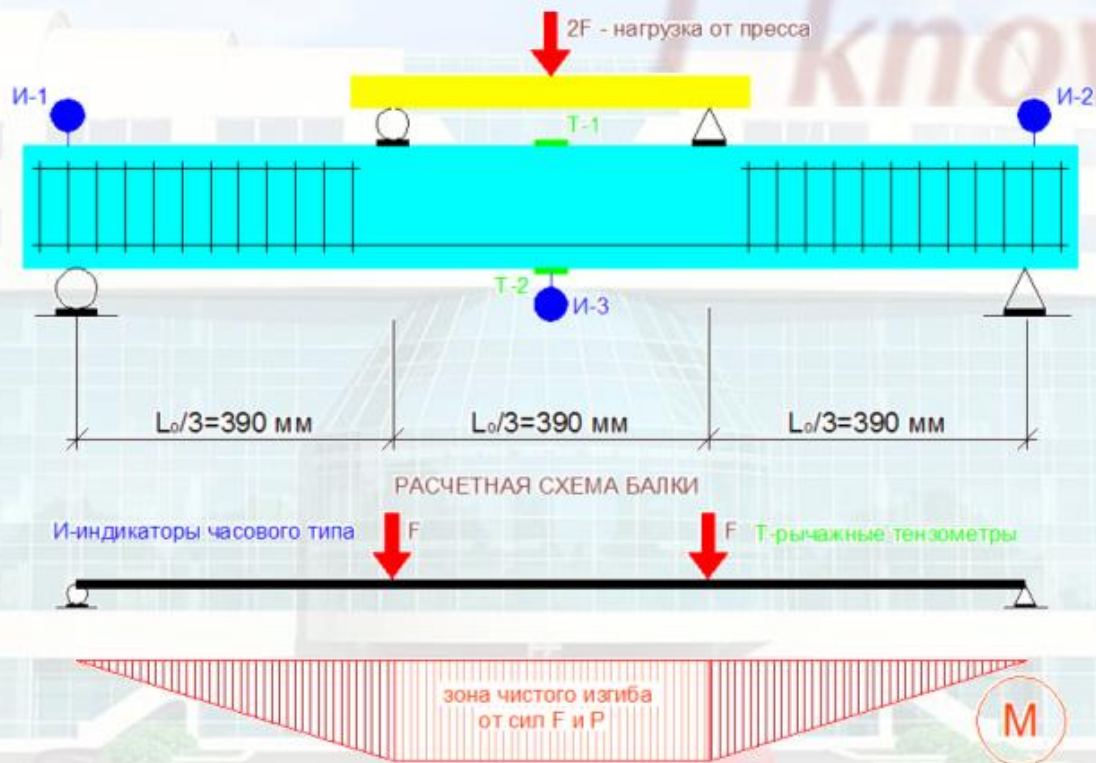
Нагрузка, соответствующая теоретическому моменту трещинообразования:

$$F_{crc,cal} = \frac{2 \cdot 3}{l_0} (M_{crc,cal} - M_{c.в.} - M_{mp}) = \frac{2 \cdot 3}{117} (17370 - 642 - 390) = 837,8 \text{ кгс}$$

Нагрузка, соответствующая теоретическому разрушающему моменту:

$$F_{ul,cal} = \frac{2 \cdot 3}{l_0} (M_{ul,cal} - M_{c.в.} - M_{mp}) = \frac{2 \cdot 3}{117} (88520 - 642 - 390) = 4\,487 \text{ кгс}$$

## Схема загрузки балки и размещения измерительных приборов



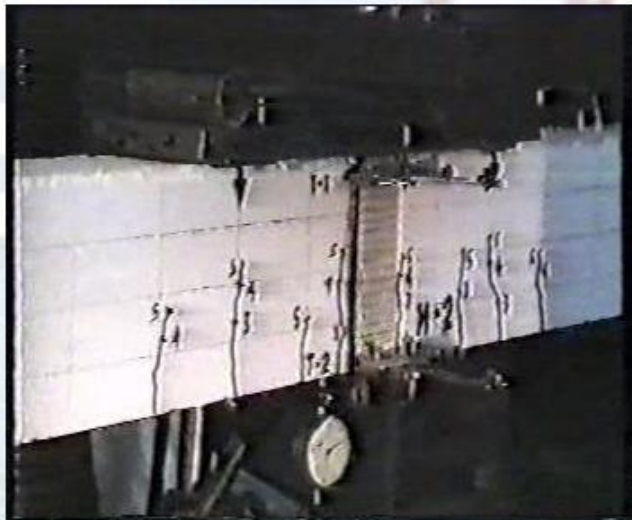
## Испытание балки



Испытание балки проводится на гидравлическом прессе. Нагрузка прикладывается поэтапно с выдержкой не менее 5 минут после каждого этапа загрузки. Нагрузка контролируется по показаниям шкалы силоизмерителя. После каждого этапа нагружения снимаются показания механических приборов и тензорезисторов. По мере увеличения нагрузки прогибы в середине балки возрастают. В средней части балки, подверженной чистому изгибу, появляются первые трещины.

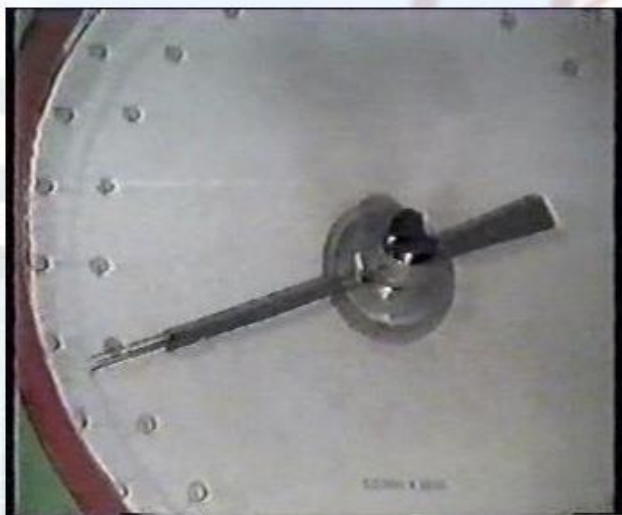


## Испытание балки



При дальнейшем увеличении нагрузки появляются новые трещины, а ширина и высота трещин, появившихся ранее, увеличивается.

## Испытание балки



Перед разрушением балки с нее снимают механические приборы. Их показания больше не представляют интереса, а опасность поломки - велика.

## Испытание балки



При достижении в растянутой арматуре предела текучести, а в сжатой зоне бетона - предела прочности на сжатие, происходит разрушение балки.

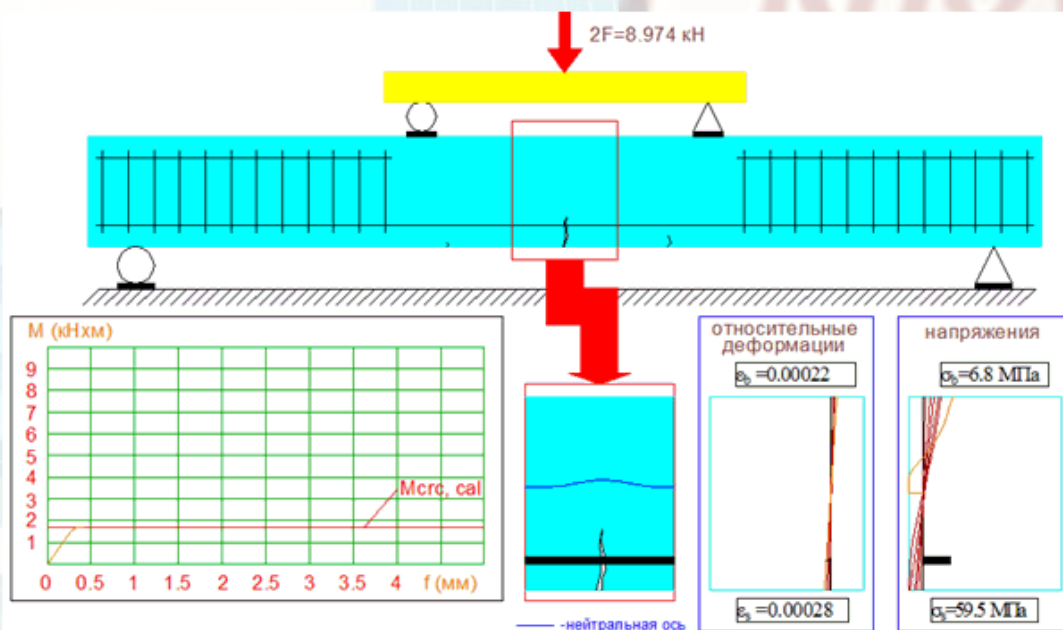
## Испытание балки

Нагрузка образования трещин

$$2 \cdot F_{\text{срс,exp}} = 754 \text{ кгс}$$

Разрушающая нагрузка

$$2 \cdot F_{\text{ул,exp}} = 4\,524 \text{ кгс}$$



## Испытание балки

Нагрузка образования трещин

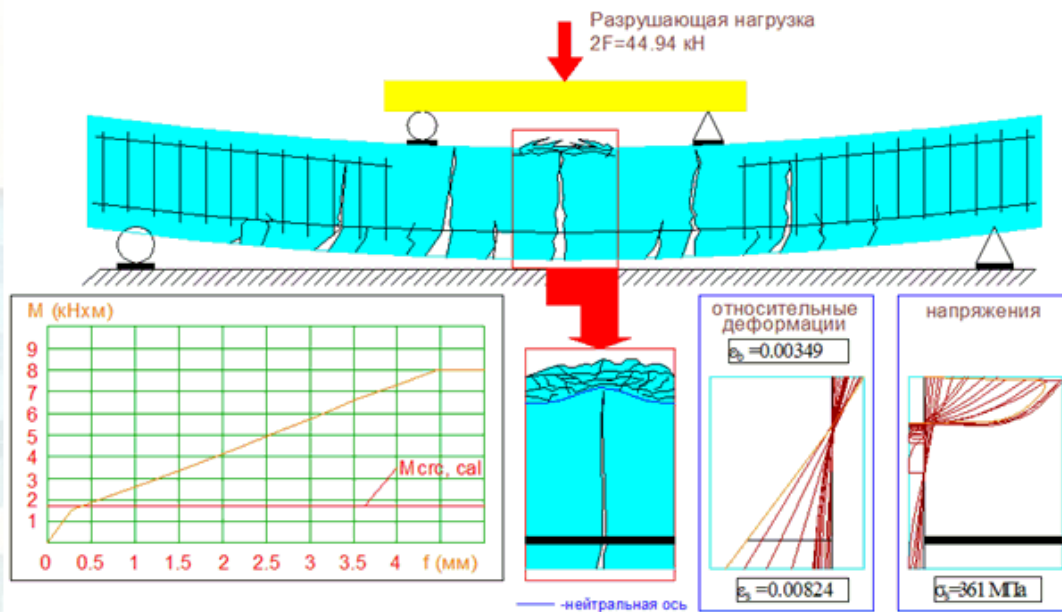
$$2 \cdot F_{\text{crс,exp}} = 754$$

кГс

Разрушающая нагрузка

$$2 \cdot F_{\text{ul,exp}} = 4\,524$$

кГс



## Испытание балки



Видно, как откалывается бетон сжатой зоны. Арматура течет. В результате, происходит быстрый рост прогиба балки без увеличения нагрузки, с последующим ее снижением.

При достижении предельного разрушающего значения изгибающего момента рост деформации происходит без увеличения нагрузки.

## Установление опытного момента трещинообразования и сравнение его с теоретическим значением

Вес загрузочных устройств	$P =$	20	кгс
Расчетная длина балки	$L_o =$	117	см
Собственный вес балки	$G =$	43,9	кгс
Теоретический момент образования трещин	$M_{crc,cal} =$	17 370	кгс·см

Нагрузка, отвечающая моменту трещинообразования:  $F_{crc,exp} = 377$  кгс

Опытный момент трещинообразования:

$$M_{crc,exp} = (F_{crc,exp} + 0,5 \cdot P) \cdot L_o / 3 + G \cdot L_o / 8$$

$$= (377 + 0,5 \cdot 20) \cdot 117 / 3 + 43,9 \cdot 117 / 8 = 21510 \quad \text{кгс·см}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{M_{crc,cal} - M_{crc,exp}}{M_{crc,cal}} \cdot 100\% = \frac{17370 - 21510}{17370} \cdot 100\% = -23,83 \quad \%$$

## Установление опытного разрушающего момента и сравнение его с теоретическим значением

Теоретический разрушающий момент	$M_{ul,cal} =$	88 520	кгс·см
Теоретическая нагрузка, отвечающая разрушающему моменту	$F_{ul,cal} / 2 =$	2 243,5	кгс
Опытная нагрузка, отвечающая разрушающему моменту	$F_{ul,exp} =$	2 262	кгс
Вес загрузочных устройств	$P =$	20	кгс
Расчетная длина балки	$L_o =$	117	см
Собственный вес балки	$G =$	43,9	кгс

Опытный разрушающий момент:

$$M_{ul,exp} = (F_{ul,exp} + 0,5 \cdot P) \cdot L_o / 3 + G \cdot L_o / 8 =$$

$$= (2262 + 0,5 \cdot 20) \cdot 117 / 3 + 43,9 \cdot 117 / 8 = 89250 \quad \text{кгс·см}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{M_{ul,cal} - M_{ul,exp}}{M_{ul,cal}} \cdot 100\% = \frac{88520 - 89250}{88520} \cdot 100\% = -0,82 \quad \%$$

## Определение максимального прогиба балки под нагрузкой

Теоретический момент трещинообразования:	$M_{crc,cal}$	= 1 737 000	Н·мм
Начальный модуль упругости бетона, отвечающий средней кубиковой прочности:	$E_b$	= 32 600	Н/мм <sup>2</sup>
Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести сечения:	$I_{red}$	= 30 690 000	мм <sup>4</sup>
Расчетная длина балки:	$L_0$	= 1 170	мм
Коэффициент для свободно опертой балки $i$	$s$	= 0,106	

Кратковременный модуль деформации бетона:

$$E_{b1} = 0,85 \cdot E_b = 0,85 \cdot 32600 = 27710 \text{ Н/мм}^2$$

Жесткость до образования трещин:

$$D = E_{b1} \cdot I_{red} = 27710 \cdot 30690000 = 850\,400\,000\,000 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2$$

Кривизна до образования трещин:

$$\left(\frac{1}{r_{max}}\right)_{a,crc} = \frac{M_{crc,cal}}{D} = \frac{1737000}{850400000000} = 0,00000204 \text{ 1/мм}$$

Прогиб до образования трещин:

$$f = s \cdot L_0^2 \cdot \left(\frac{1}{r_{max}}\right) = 0,106 \cdot 1170^2 \cdot 0,00000204 = 0,3 \text{ мм}$$

## Определение максимального прогиба балки под нагрузкой

Кривизна при наличии трещин:

Теоретический разрушающий момент:	$M_{ul,cal}$	= 88 520	кгс·см
Теоретический момент трещинообразования:	$M_{crc,cal}$	= 17 370	кгс·см
Рабочая высота сечения:	$h_0$	= 12	см
Ширина сечения:	$b$	= 10	см
Площадь сечения арматуры:	$A_s$	= 2,26	см <sup>2</sup>
Высота сжатой зоны перед разрушением:	$x$	= 2,91	см
Коэффициент упругости при кратковременном нагружении (по СНиП):	$\nu$	= 0,45	
Модуль упругости бетона:	$E_b$	= 332 300	кгс·см <sup>2</sup>
Модуль упругости арматуры:	$E_s$	= 2 140 000	кгс·см <sup>2</sup>
Коэффициент	$\psi_b$	= 0,9	

$$\text{Коэффициент } \psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crc,cal}}{M_{ul,cal}} = 1 - 0,8 \cdot \frac{17370}{88520} = 0,84$$

$$\text{Относительная высота сжатой зоны: } \xi = \frac{x}{h_0} = \frac{2,91}{12} = 0,24$$

## Определение максимального прогиба балки под нагрузкой

### Кривизна при наличии трещин:

Модуль упругости бетона:	$E_b$	= 332 300	кГс·см <sup>2</sup>
Модуль упругости арматуры:	$E_s$	= 2 140 000	кГс·см <sup>2</sup>
Коэффициент	$\psi_b$	= 0,9	
Коэффициент	$\psi_s$	= 0,84	
Относительная высота сжатой зоны	$\xi$	= 0,24	
Коэффициент для свободно опертой балки и сосредоточенных грузах в третях пролета	$s$	= 0,106	
Расчетная длина балки	$L_0$	= 1 170	мм

Плечо внутренней пары сил:  $z = h_0 - \frac{x}{2} = 12 - \frac{2,91}{2} = 10,55$  см

$$\left(\frac{1}{r_{\max}}\right)_{b,crs} = \frac{M_{ul,cal}}{h_0 \cdot z} \left( \frac{\psi_s}{E_s A_s} + \frac{\psi_b}{\nu E_b \xi b h_0} \right) = \frac{88520}{12 \cdot 10,55} \cdot$$

$$\left( \frac{0,84}{2140000 \cdot 2,26} + \frac{0,9}{0,45 \cdot 332300 \cdot 0,24 \cdot 10 \cdot 12} \right) =$$

$$= 0,000147 \text{ 1/мм}$$

Прогиб при разрушении:  $f = s \cdot L_0^2 \cdot \left(\frac{1}{r_{\max}}\right) = 0,106 \cdot 1170^2 \cdot 0,000147 =$

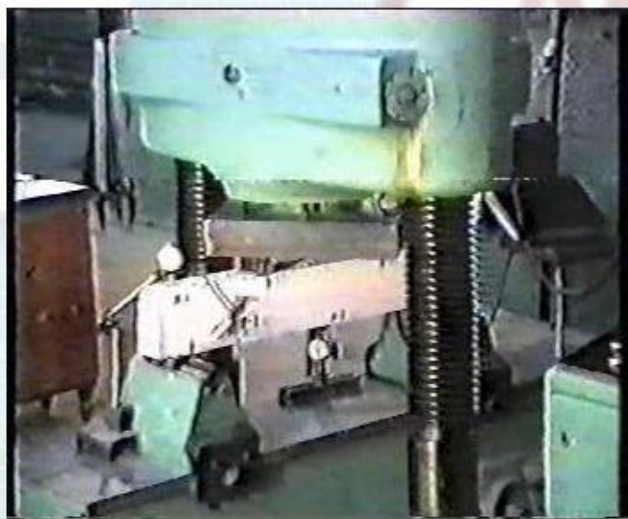
= 2,13 мм

## Лабораторная работа №2: Испытание железобетонной балки на изгиб с разрушением по наклонному сечению

### Порядок выполнения работы:

1. Определение расчетных характеристик бетона в момент испытания
2. Определение расчетных характеристик арматуры
3. Геометрические размеры, схема армирования и схема нагружения балки
4. Схема загрузки балки
5. Определение теоретической разрушающей поперечной силы
6. Испытание балки
7. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений

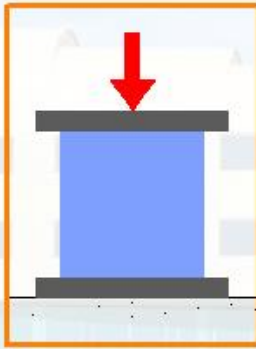
### Цель лабораторной работы



Целью настоящей работы является изучение напряженно-деформированного состояния в наклонном сечении изгибаемого элемента на различных стадиях загрузки: упругая работа, появление и развитие наклонных трещин и разрушение. Демонстрируемый видеоряд знакомит с операциями, выполняемыми при натурном опыте.

## Определение расчетных характеристик бетона в момент испытания

Определение кубиковой прочности бетона по испытаниям кубов с ребром 15см



$$R_1 = 41,3 \quad \text{Н/мм}^2$$

$$R_2 = 36,5 \quad \text{Н/мм}^2$$

$$R_3 = 38,6 \quad \text{Н/мм}^2$$

Среднее значение кубиковой прочности бетона по результатам испытания кубов:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} = \frac{41,3 + 36,5 + 38,6}{3} = 38,8 \quad \text{Н/мм}^2$$

Призменная прочность бетона, отвечающая средней кубиковой прочности:

$$R_b = (0,77 - 0,00125\bar{R})\bar{R} = (0,77 - 0,00125 \cdot 38,8) \cdot 38,8 = 28 \quad \text{Н/мм}^2$$

Прочность бетона при растяжении, отвечающая средней кубиковой прочности:

$$R_{bt} = \frac{5\bar{R}}{45 + \bar{R}} = \frac{5 \cdot 38,8}{45 + 38,8} = 2,32 \quad \text{Н/мм}^2$$

## Определение расчетных характеристик арматуры

Определение сопротивления растяжению поперечной арматуры Вр-I (диаметр 3мм)



$$\sigma_{u1} = 553 \quad \text{Н/мм}^2 \quad \sigma_{u2} = 554 \quad \text{Н/мм}^2 \quad \sigma_{u3} = 529 \quad \text{Н/мм}^2$$

Среднее значение условного предела текучести:

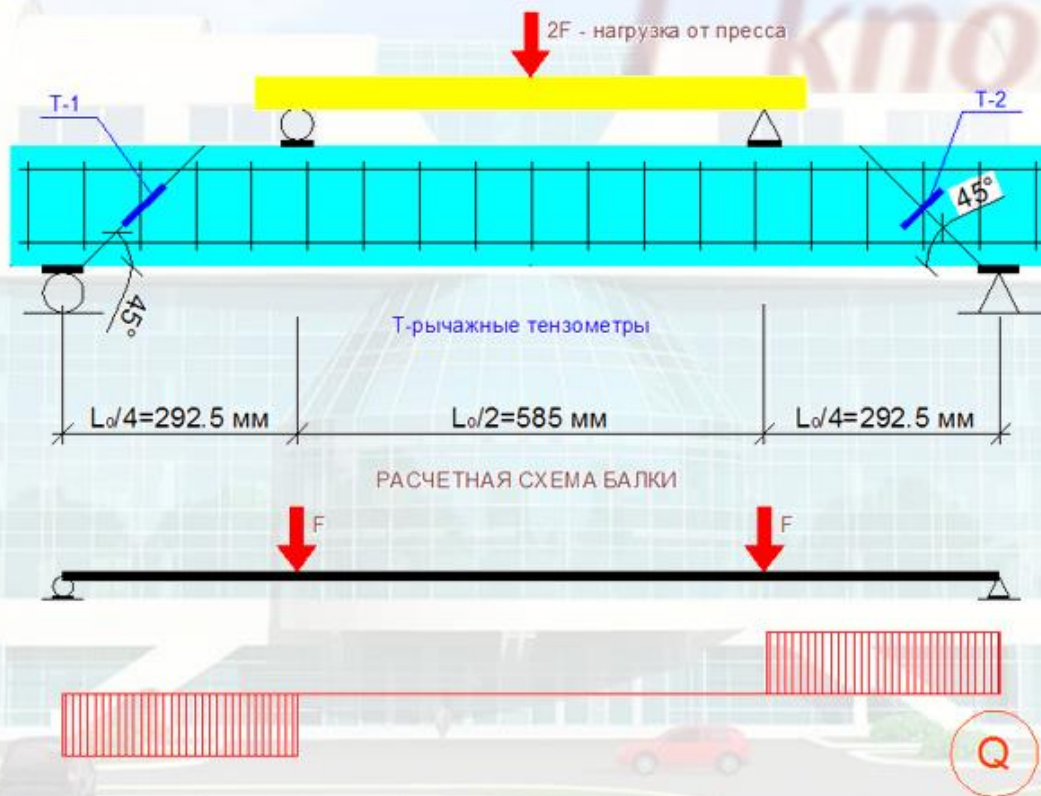
$$R_s = \frac{0,75(\sigma_{u1} + \sigma_{u2} + \sigma_{u3})}{3} = \frac{0,75(553 + 554 + 529)}{3} = 409 \quad \text{Н/мм}^2$$

Стержни поперечной арматуры (хомуты) по длине наклонной трещины растянуты неравномерно. Принимаем за сопротивление растяжению поперечной арматуры величину условного предела текучести, умноженного на коэффициент условий работы  $\gamma_{s1}=0,8$ :

$$R_{sw} = \gamma_{s1} R_s = 0,8 \cdot 409 = 327,2 \quad \text{Н/мм}^2$$



## Геометрические размеры, схема армирования и схема нагружения балки



## Арматурный каркас



Для проведения натуральных испытаний изготовлена ж/б балка прямоугольного сечения шириной 10 см, высотой 15 см и длиной 130 см. В качестве поперечной арматуры (хомутов) принята проволока диаметром 3 мм класса В-1. Хомуты поставлены с шагом 70 мм. Каркас сконструирован так, чтобы преимущественным оказалось разрушение по наклонному сечению.

## Схема загрузки балки



Нагрузка на балку прикладывается в четверти пролета через распределительную траверсу.

## Схема загрузки балки



В процессе нагружения с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм производятся измерения прогибов в середине пролета балки.

## Геометрические размеры, схема армирования и схема нагружения балки

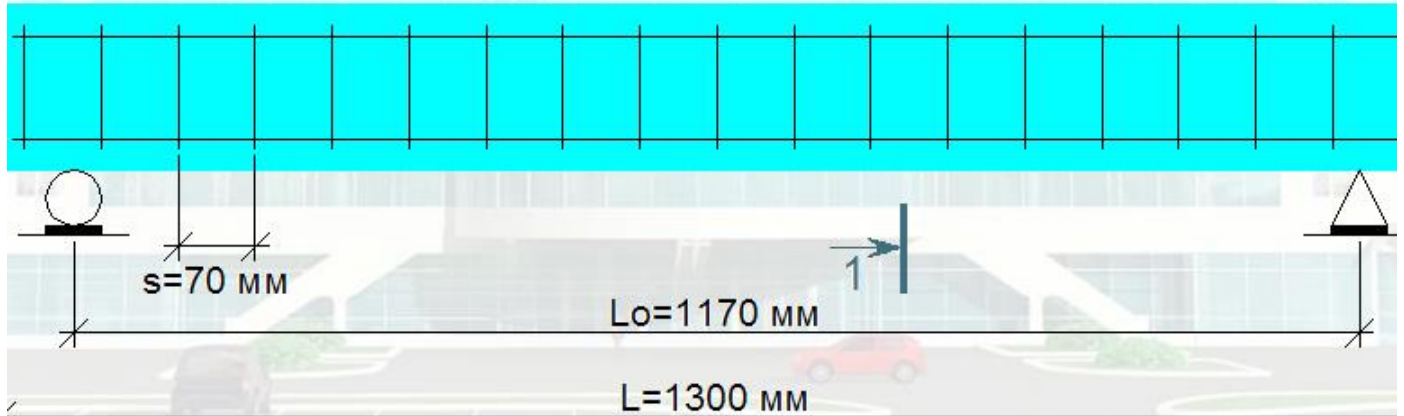
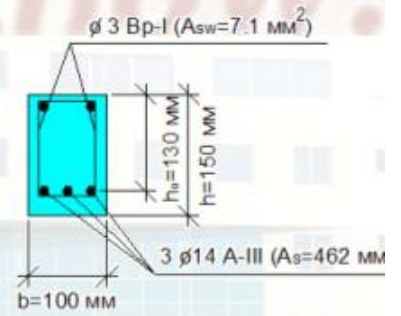
Вес грузочных устройств:

$$P = 200 \text{ Н}$$

1-1

Собственный вес балки:

$$G = b \cdot h \cdot \gamma \cdot g = 0,1 \cdot 0,15 \cdot 2500 \cdot 9,81 = 367,9 \text{ Н/м}$$

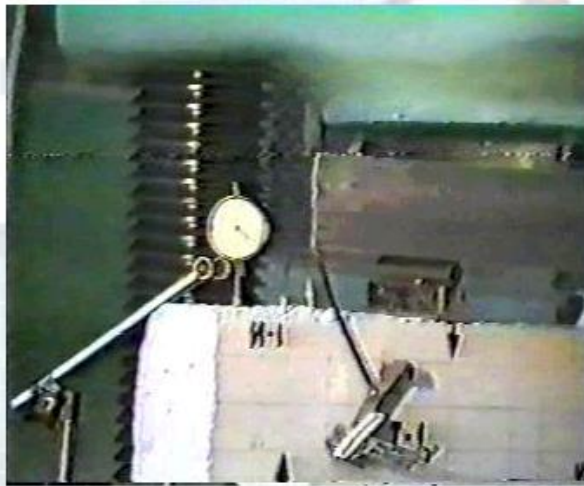


## Измерения главных напряжений



Деформации бетона в направлениях главных сжимающих и растягивающих напряжений измеряются рычажными тензометрами с базой 100 мм.

## Измерения осадок балки на опорах



Для измерения осадок балки под нагрузкой на опорах установлены 2 индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм.

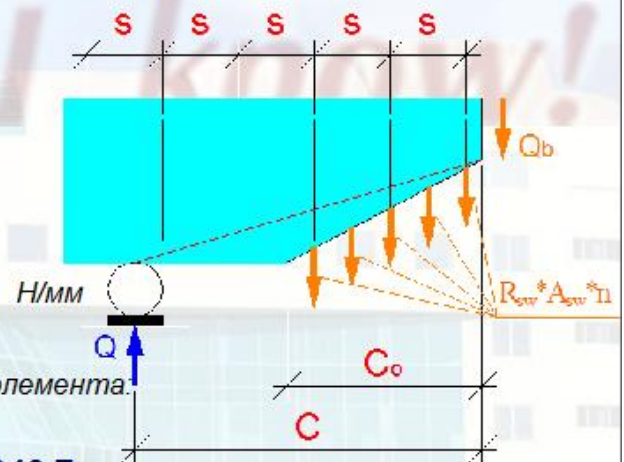
## Определение теоретической разрушающей поперечной силы

Погонное усилие в поперечных стержнях:

$$q_{sw} = \frac{R_{sw} A_{sw,i} n}{s} = \frac{327,2 \cdot 7,1 \cdot 2}{70} = 66,4 \text{ Н/мм}$$

Длина проекции наклонной трещины на продольную ось элемента:

$$c_o = \sqrt{\frac{\varphi_{b2} R_{bt} b h_o^2}{q_{sw}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,32 \cdot 100 \cdot 130^2}{66,4}} = 343,7 \text{ мм}$$



поперечного стержня

Расстояние от опоры до ближайшей сосредоточенной силы:  $c = 292,5 \text{ мм}$

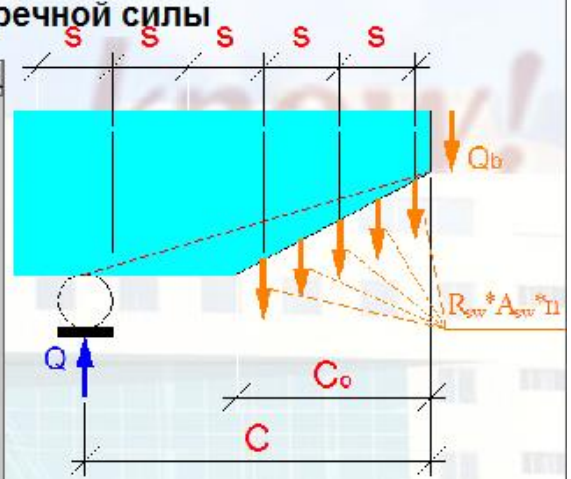
Число срезов хомута в сечении балки:  $n = 2$

Для тяжелого бетона  $\varphi_{b2} = 2$

Прочность бетона при растяжении,  $R_{bt} = 2,32$

## Определение теоретической разрушающей поперечной силы

Рабочая высота сечения	$h_0=130$	мм
Ширина поперечного сечения	$b=100$	мм
Шаг хомутов	$s=70$	мм
Прочность бетона при осевом растяжении	$R_{sw}=327,2$	Н/мм <sup>2</sup>
Расстояние от опоры до ближайшей сосредоточенной силы	$c=292,5$	мм
Для тяжелого бетона	$\varphi_{b2}=2$	
Прочность бетона при растяжении, отвечающая	$R_{bt}=2,32$	Н/мм <sup>2</sup>



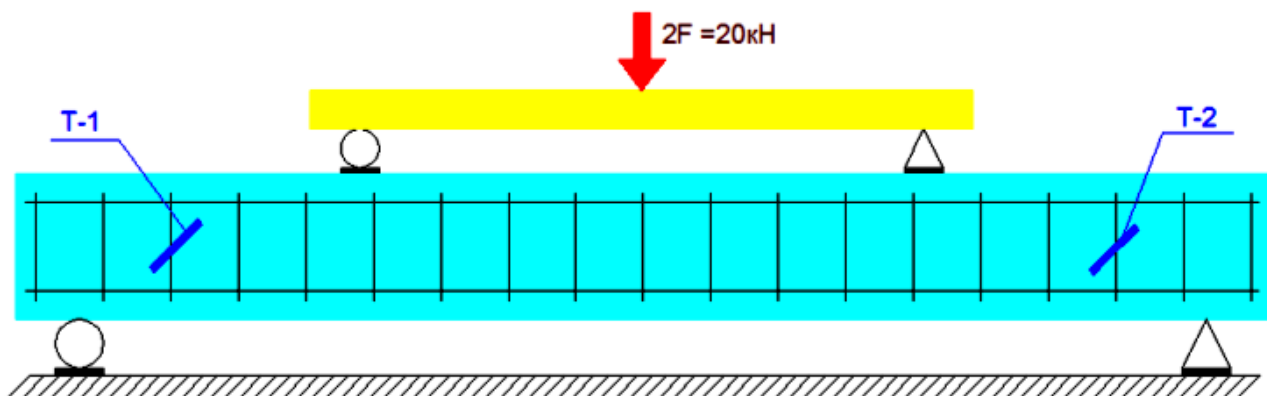
Значение  $c_0$  должно удовлетворять условиям  $h_0 \leq c_0 \leq 2h_0$  и  $c_0 \leq c$ , поэтому принимаем  $c_0 = 260$  мм

Разрушающая поперечная сила из условия расчета на действие поперечной силы:

$$Q_{ul,cal} = \frac{\varphi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{c} + q_{sw} c_0 = \frac{2 \cdot 2,32 \cdot 100 \cdot 130^2}{292,5} + 66,4 \cdot 260 = 44\,070 \text{ Н}$$

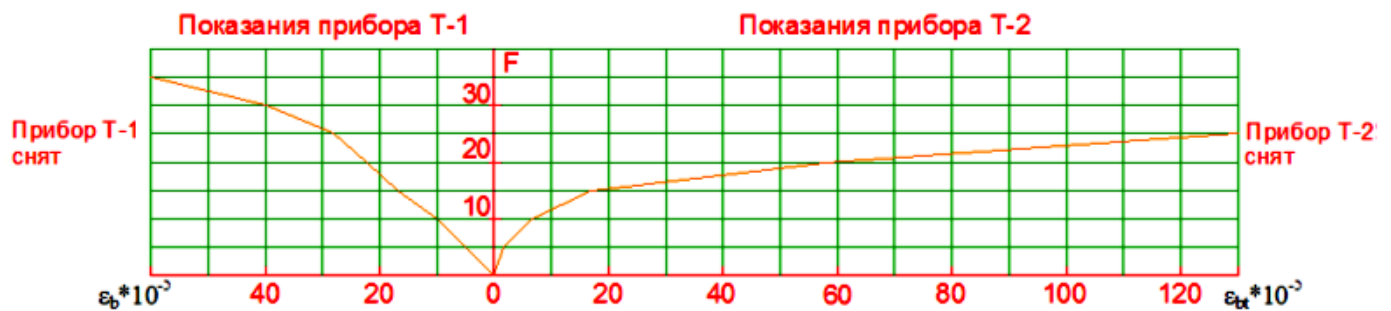
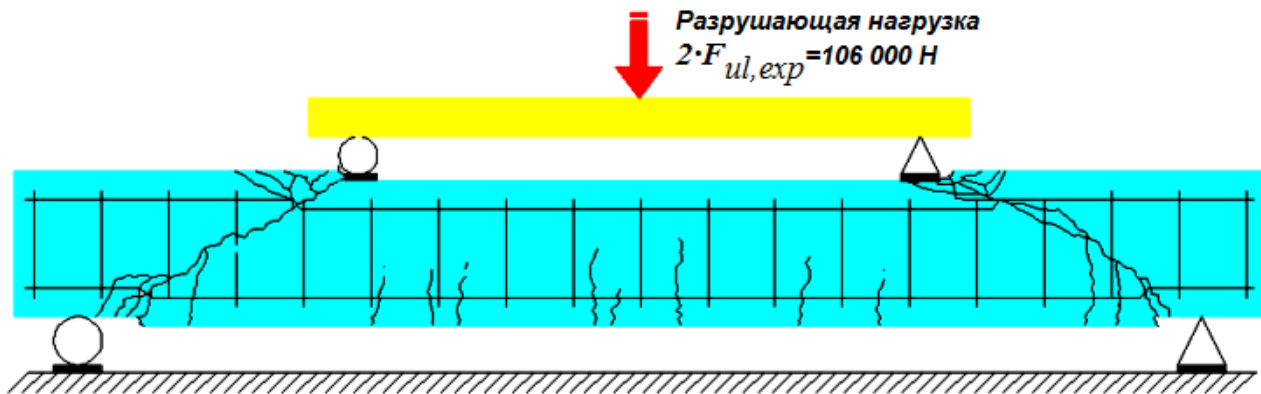
## Испытание балки

Разрушающая нагрузка  $2 \cdot F_{ul,exp} = 106\,000 \text{ Н}$



## Испытание балки

Разрушающая нагрузка  $2 \cdot F_{ul,exp} = 106\ 000\ \text{H}$



## Испытание балки



Испытание балки проводится на гидравлическом прессе. Нагрузка прикладывается поэтапно с выдержкой после каждого этапа загрузки не менее 5 мин. После каждого этапа загрузки снимаются показания с механических приборов, индикаторов механического типа и рычажных тензометров.

Тензометр Т1 позволяет определить сжимающее напряжение, а тензометр Т2 – главное растягивающее напряжение по соответствующим деформациям.

По мере увеличения нагрузки, прогибы балки увеличиваются, появляются первые наклонные трещины в опорных зонах балки, там, где действует поперечное усилие. Трещины на каждом этапе обводятся тушью с отметкой номера этапа загрузки. Видно, что у опоры образуется не одна

## Сопоставление теоретических и экспериментальных значений

Собственный вес балки	$G$	$=367,9$	$H/м$
Расчетная длина балки	$L_o$	$=1,17$	$м$
Вес загрузочных устройств	$P$	$=200$	$H$
Разрушающая поперечная сила из условия расчета на действие поперечной силы	$Q_{ul,cal}$	$=44\ 070$	$H$

Опытная нагрузка при разрушении:  $F_{ul,exp} = 53\ 000\ H$

Экспериментальная разрушающая поперечная сила:

$$Q_{ul,exp} = F_{ul,exp} + \frac{GL_o}{2} + 0,5P = 53000 + \frac{367,9 \cdot 1,17}{2} + 0,5 \cdot 200 = 53\ 310\ H$$

Величина отклонения в %:

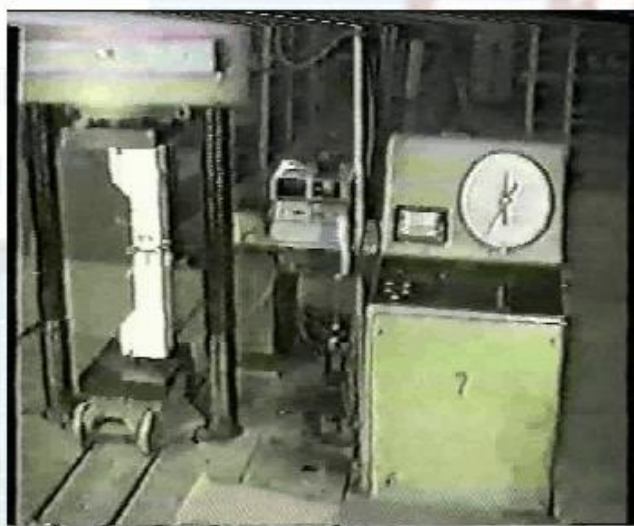
$$\frac{Q_{ul,cal} - Q_{ul,exp}}{Q_{ul,cal}} \cdot 100\% = \frac{44070 - 53310}{44070} \cdot 100\% = -20,9\ \%$$

## Лабораторная работа №3: Испытание железобетонной колонны на внецентренное сжатие

### Порядок выполнения работы:

1. Определение расчетных характеристик растянутой арматуры
2. Определение расчетных характеристик сжатой арматуры
3. Определение расчетных характеристик бетона
4. Геометрические размеры и схема армирования колонны
5. Схема загрузки колонны
6. Определение теоретической продольной разрушающей силы
7. Испытание колонны
8. Сопоставление результатов опыта и расчетов

### Цель лабораторной работы



Целью работы является изучение напряженно-деформированного состояния нормального сечения сжатого короткого железобетонного элемента на различных стадиях его загрузки. Демонстрируемый видеоряд знакомит с операциями, выполняемыми при натурном опыте.

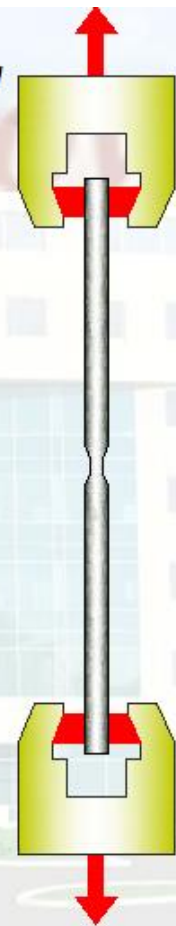
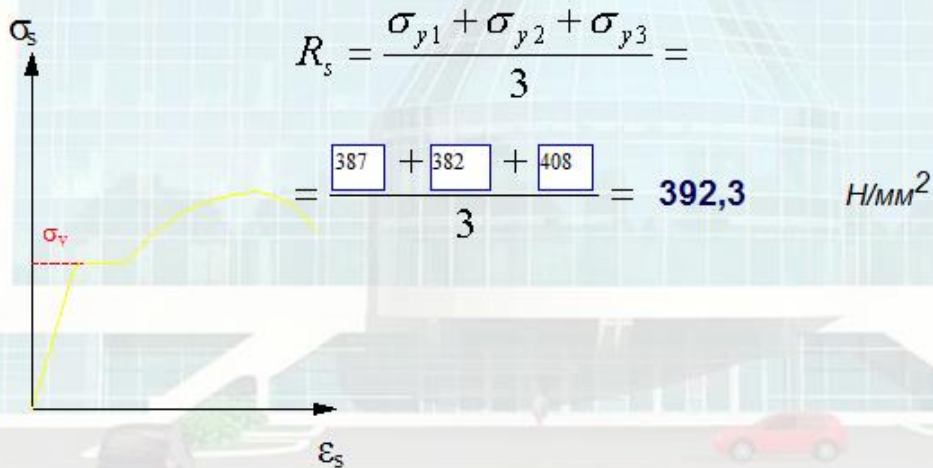


## Определение расчетных характеристик растянутой арматуры

Определение сопротивления растяжению стержневой арматуры А-III (диаметр 14 мм.)

$$\sigma_{y1} = 387 \text{ Н/мм}^2 \quad \sigma_{y2} = 382 \text{ Н/мм}^2 \quad \sigma_{y3} = 408 \text{ Н/мм}^2$$

В качестве расчетного сопротивления арматуры растяжению принимаем среднее значение физического предела текучести:



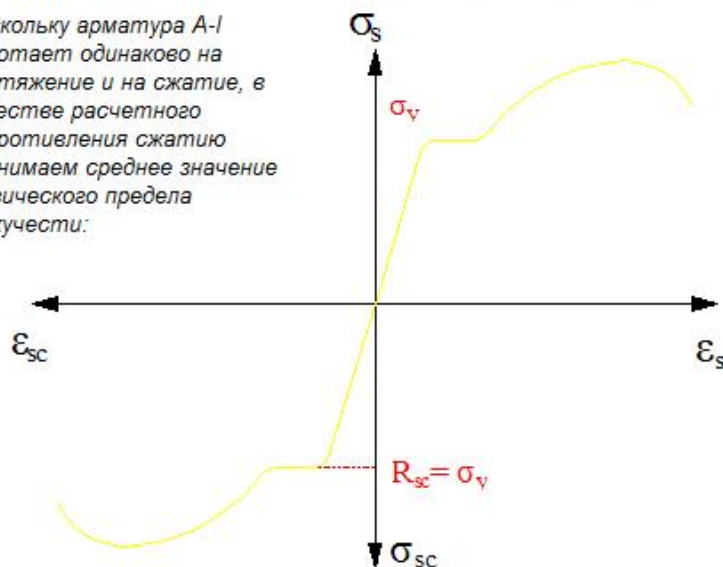
## Определение расчетных характеристик сжатой арматуры

Определение сопротивления сжатию стержневой арматуры А-I (диаметр 8мм) (образцы испытываются на растяжение).

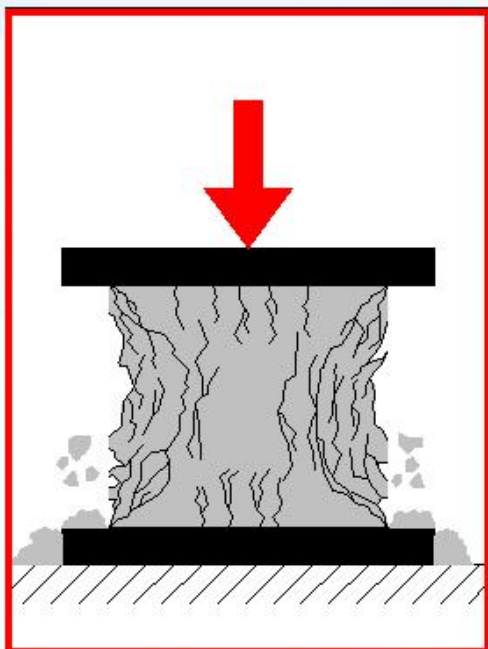
$$\sigma_{y1} = 234 \text{ Н/мм}^2 \quad \sigma_{y2} = 242 \text{ Н/мм}^2 \quad \sigma_{y3} = 248 \text{ Н/мм}^2$$

$$R_{sc} = \frac{\sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3}}{3} = \frac{234 + 242 + 248}{3} = 241,3 \text{ Н/мм}^2$$

Поскольку арматура А-I работает одинаково на растяжение и на сжатие, в качестве расчетного сопротивления сжатию принимаем среднее значение физического предела текучести:



## Определение расчетных характеристик бетона



$$R_1 = 40 \quad \text{Н/мм}^2$$

$$R_2 = 38 \quad \text{Н/мм}^2$$

$$R_3 = 40 \quad \text{Н/мм}^2$$

Среднее значение кубиковой прочности бетона по результатам испытания кубов:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} = \frac{40 + 38 + 40}{3} = 39,3 \quad \text{Н/мм}^2$$

Призменная прочность бетона, отвечающая средней кубиковой прочности:

$$R_b = (0,77 - 0,00125\bar{R})\bar{R} = (0,77 - 0,00125 \cdot 39,3) \cdot 39,3 = 28,3 \quad \text{Н/мм}^2$$

## Определение расчетных характеристик бетона

Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_s = 392,3$	Н/мм <sup>2</sup>
Среднее значение кубиковой прочности бетона	$\bar{R} = 39,3$	Н/мм <sup>2</sup>
Призменная прочность бетона	$R_b = 28,3$	Н/мм <sup>2</sup>

Прочность бетона при осевом растяжении, отвечающая средней кубиковой прочности:

$$R_{bt} = \frac{5\bar{R}}{45 + \bar{R}} = \frac{5 \cdot 39,3}{45 + 39,3} = 2,33 \quad \text{Н/мм}^2$$

Определение характеристики сжатой зоны бетона:

$$\omega = 0,85 - 0,008R_b = 0,85 - 0,008 \cdot 28,3 = 0,624 \quad \text{Н/мм}^2$$

Определение граничного значения относительной высоты сжатой зоны бетона:

$$\xi_R = \frac{\omega}{\left(1 + \frac{R_s}{400} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)\right)} = \frac{0,624}{\left(1 + \frac{392,3}{400} \left(1 - \frac{0,624}{1,1}\right)\right)} = 0,44$$

## Схема загрузки колонны



Для натурного испытания изготовлена железобетонная короткая стойка с консолями для удобства внецентренного приложения сжимающей нагрузки. Колонна армирована вязаными каркасами из 4-х продольных стержней и замкнутых хомутов.

Испытание производится на гидравлическом прессе. Стойка оборудуется механическими и электрическими приборами - тензометрами и тензорезисторами для измерения деформаций в наиболее напряженном сечении. Рост нагрузки фиксируется стрелкой силоизмерителя пресса.

## Определение теоретической продольной разрушающей силы

Рабочая высота сечения	$h_0 = 134$	мм
Площадь сечения растянутой арматуры	$A_s = 308$	мм <sup>2</sup>
Площадь сечения сжатой арматуры	$A_s' = 101$	мм <sup>2</sup>

Граничная высота сжатой зоны:

$$x_R = \xi_R h_0 = 0,44 \cdot 134 = 59 \text{ мм}$$

Высота сжатой зоны (вычисляется из условия равенства нулю суммы моментов всех сил относительно оси действия продольной силы):

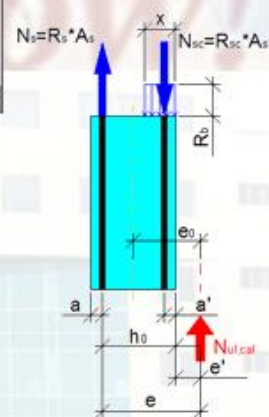
$$x = (h_0 - e) + \sqrt{(e - h_0)^2 + \frac{2(R_s A_s e - R_{sc} A_s' e')}{R_b b}}$$

$$= (134 - 230) + \sqrt{(230 - 134)^2 + \frac{2(392,3 \cdot 308 \cdot 230 - 241,3 \cdot 101 \cdot 120)}{28,3 \cdot 151}} = 48,4 \text{ мм}$$

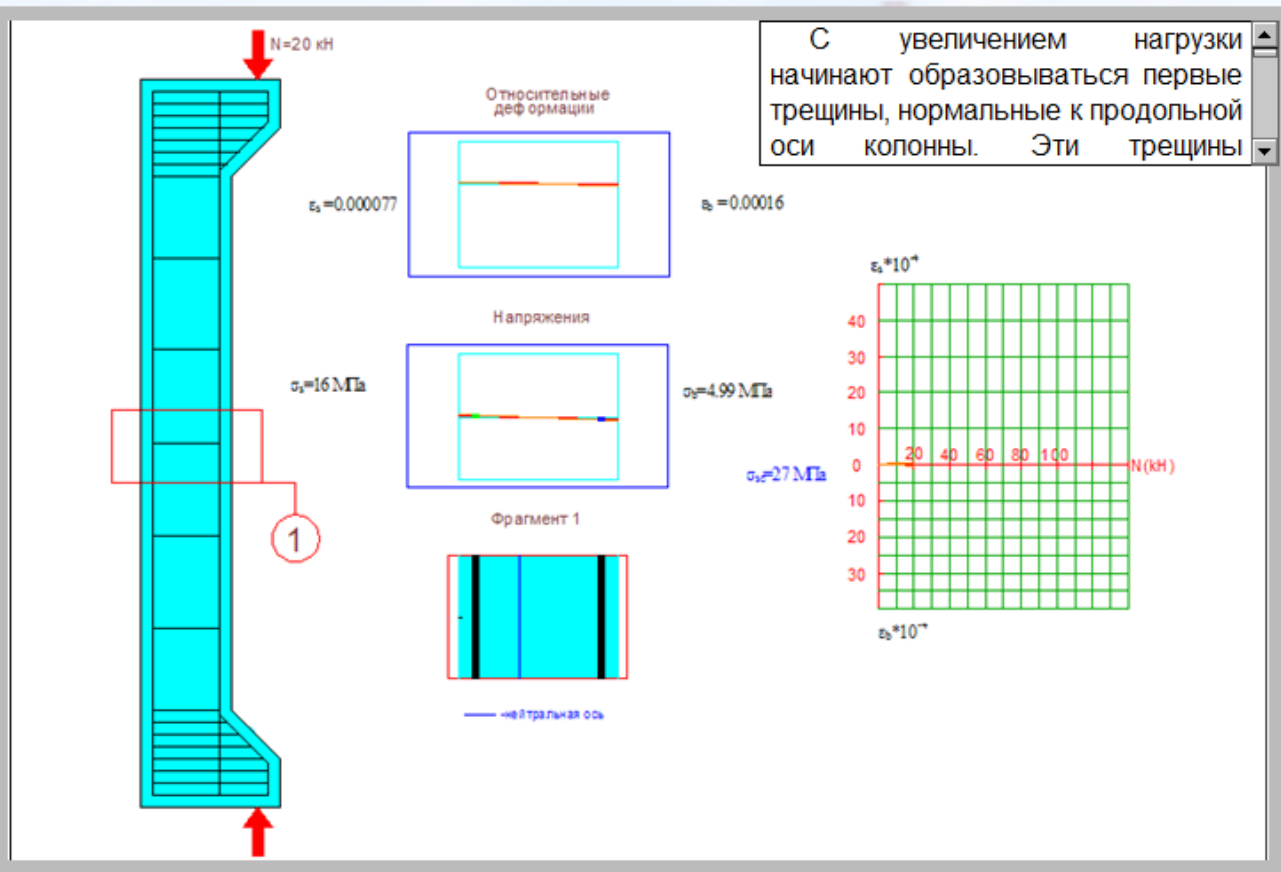
Т.к.  $x < x_R$ , имеем I-ый случай внецентренного сжатия.

Теоретическое значение продольной разрушающей силы (вычисляется из условия равенства нулю суммы проекций всех сил на продольную ось):

$$N_{ul,cal} = R_b b x + R_{sc} A_s' - R_s A_s = 28,3 \cdot 151 \cdot 48,4 + 241,3 \cdot 101 - 392,3 \cdot 308 = 110\,300$$



## Испытание колонны



## Испытание колонны

$$N_{ul, \text{exp}} = 123\,000 \text{ Н}$$



Рост нагрузки приводит к дальнейшему увеличению длины трещин и ширины их раскрытия. Все более заметна кривизна колонны.

Если мысленно повернуть колонну на  $90^\circ$ , то легко увидеть, что расположение и направление трещин близко к тому, что мы наблюдали в зоне чистого изгиба балки, которую испытывали в 1-ой лабораторной работе. Это подтверждает аналогию между работой изгибаемых элементов и внецентренно сжатых элементов с большим эксцентриситетом. Обратите внимание на то, что расчетные эпюры напряжений в этих элементах также одинаковы. Наконец, с помощью силоизмерителя обнаруживаем, что, несмотря на подачу масла в цилиндр гидравлического пресса, нагрузка не растет. Это свидетельствует о том, что растянутая арматура достигла предела

## Сопоставление результатов опыта и расчетов

I know!

Теоретическая разрушающая сила:

$$N_{ul,cal} = 110\,300 \text{ Н}$$

Опытная разрушающая сила:

$$N_{ul,exp} = 123\,000 \text{ Н}$$

Величина отклонения в %:

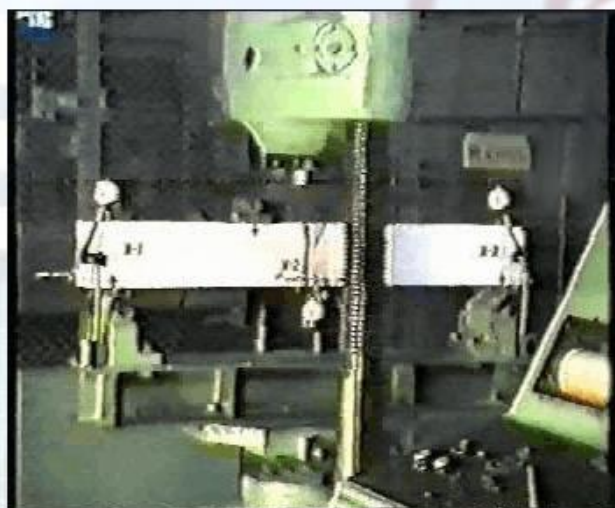
$$\frac{N_{ul,cal} - N_{ul,exp}}{N_{ul,cal}} \cdot 100\% = \frac{110300 - 123000}{110300} \cdot 100\% = -11,51\%$$

## Лабораторная работа №4: Испытание предварительно напряженной железобетонной балки на изгиб с разрушением по нормальному сечению

### Порядок выполнения работы:

1. Определение расчетных характеристик бетона в момент отпуска предварительного напряжения
2. Определение расчетных характеристик бетона в момент испытания
3. Определение расчетных характеристик арматуры
4. Геометрические размеры и схема армирования испытываемой балки
5. Определение характеристик приведенного сечения
6. Определение потерь предварительного напряжения
7. Определение теоретического момента трещинообразования
8. Определение теоретического разрушающего момента
9. Определение теоретического перемещения середины пролета
10. Схема загрузки балки
11. Испытание балки
12. Сопоставление теоретических и экспериментальных значений

### Цель лабораторной работы



Целью лабораторной работы является изучение прочности, трещиностойкости и деформативности предварительно напряженного железобетонного изгибаемого элемента. Демонстрируемый видеоряд знакомит с операциями, выполняемыми при натурном опыте.

## Определение расчетных характеристик бетона в момент отпуска предварительного напряжения

Среднее значение передаточной прочности бетона по результатам испытания трех кубов:

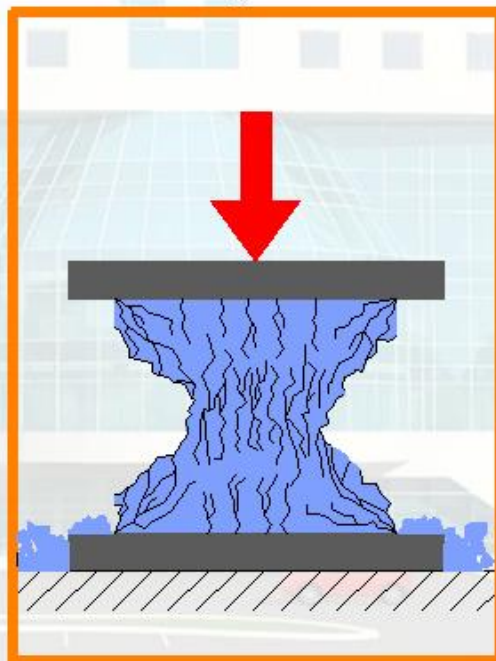
$$\overline{R}_{bp} = \frac{R_{bp1} + R_{bp2} + R_{bp3}}{3} = \frac{29,6 + 25,6 + 30,8}{3} = 28,7 \text{ Н/мм}^2$$

Определение передаточной прочности бетона по испытаниям кубов с ребром 15 см

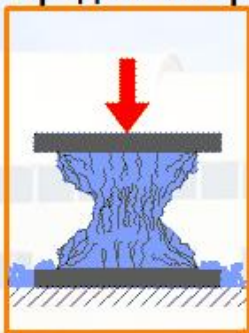
$$R_{bp1} = 29,6 \text{ Н/мм}^2$$

$$R_{bp2} = 25,6 \text{ Н/мм}^2$$

$$R_{bp3} = 30,8 \text{ Н/мм}^2$$



## Определение расчетных характеристик бетона в момент испытания



Определение кубиковой прочности по испытаниям кубов с ребром 15 см

$$R_1 = 36 \text{ Н/мм}^2 \quad R_2 = 37 \text{ Н/мм}^2 \quad R_3 = 38,7 \text{ Н/мм}^2$$

Среднее значение кубиковой прочности бетона по результатам испытания кубов:

$$\overline{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} = \frac{36 + 37 + 38,7}{3} = 37,2 \text{ Н/мм}^2$$

Призменная прочность бетона, отвечающая средней кубиковой прочности:

$$R_b = (0,77 - 0,00125\overline{R})\overline{R} = (0,77 - 0,00125 \cdot 37,2) \cdot 37,2 = 26,9 \text{ Н/мм}^2$$

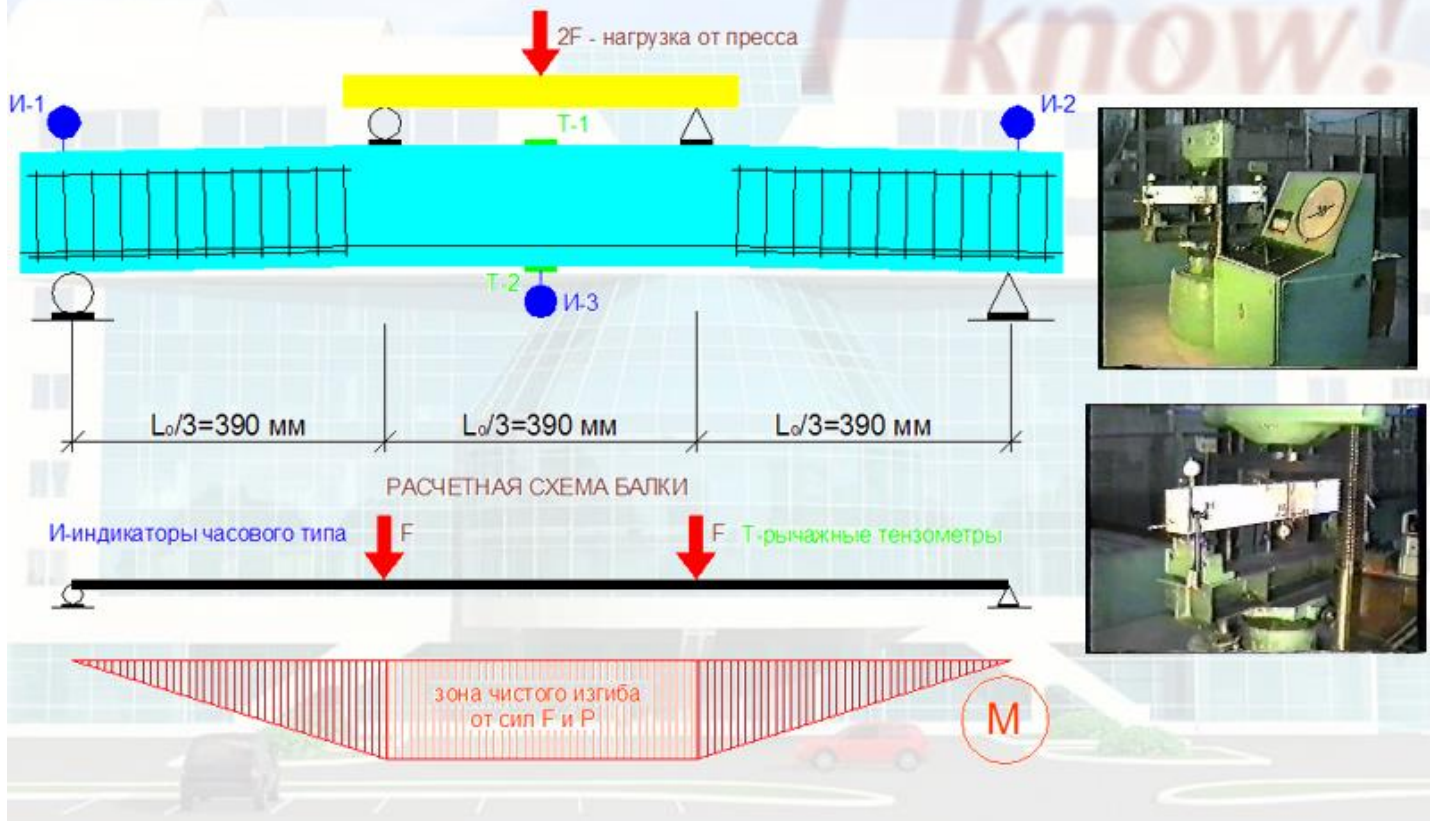
Прочность бетона при осевом растяжении, отвечающая средней кубиковой прочности:

$$R_{bt} = \frac{5\overline{R}}{45 + \overline{R}} = \frac{5 \cdot 37,2}{45 + 37,2} = 2,26 \text{ Н/мм}^2$$

Начальный модуль упругости бетона, отвечающий средней кубиковой прочности:

$$E_b = \frac{55000\overline{R}}{27 + \overline{R}} = \frac{55000 \cdot 37,2}{27 + 37,2} = 31\,860 \text{ Н/мм}^2$$

## Схема загрузки балки и размещения на ней измерительных приборов



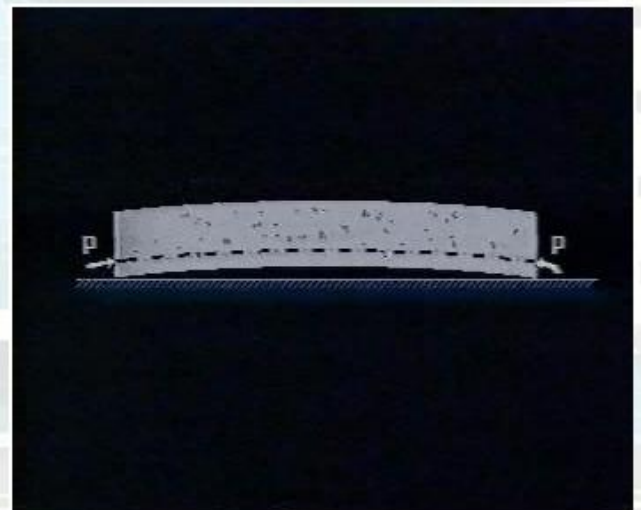
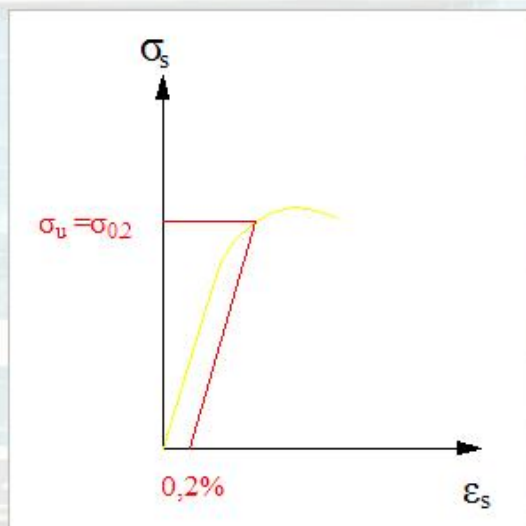
## Определение расчетных характеристик арматуры

Определение сопротивления растяжению стержневой арматуры А-V (диаметр 14 мм)

$$\sigma_{u1} = 791 \text{ Н/мм}^2 \quad \sigma_{u2} = 776 \text{ Н/мм}^2 \quad \sigma_{u3} = 765 \text{ Н/мм}^2$$

В качестве расчетного сопротивления арматуры растяжению принимаем среднее значение условного предела текучести:

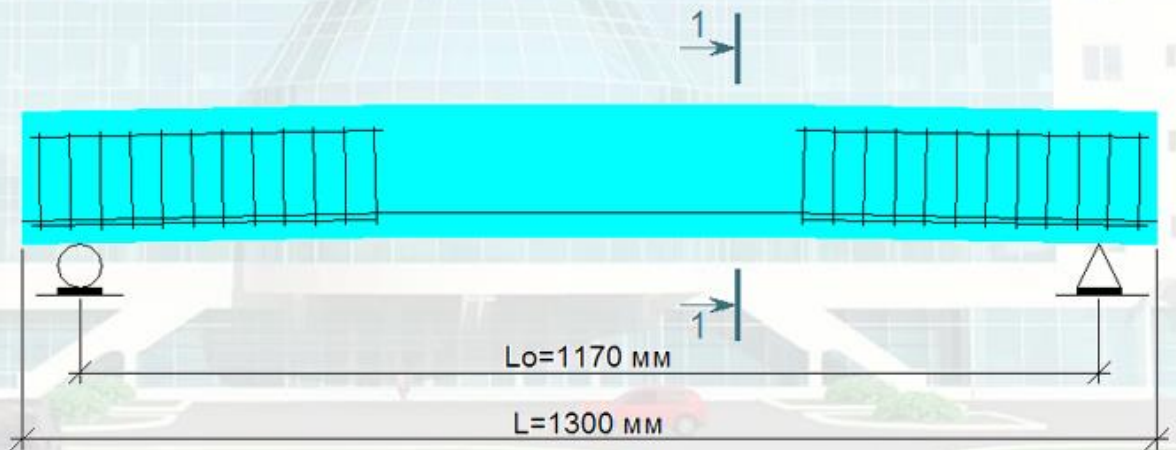
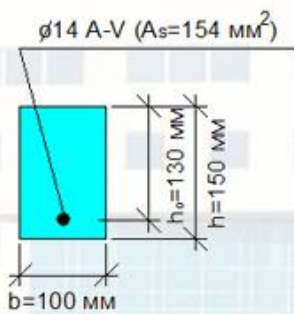
$$\overline{R_{sp}} = \frac{\sigma_{u1} + \sigma_{u2} + \sigma_{u3}}{3} = \frac{791 + 776 + 765}{3} = 777,3 \text{ Н/мм}^2$$





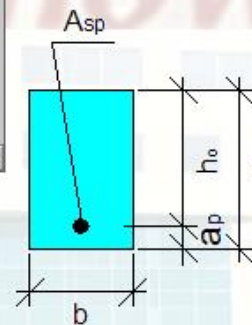
## Геометрические размеры и схема армирования испытываемой балки

1-1



### Определение характеристик приведенного сечения

Рабочая высота сечения	$h_0=130$	мм
Ширина сечения	$b=100$	мм
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры $A_{sp}$	$a_p=20$	мм
Площадь поперечного сечения напрягаемой арматуры диаметр 14 мм	$A_{sp}=154$	мм <sup>2</sup>



$$\alpha_{sp} = \frac{E_{sp}}{E_b} = \frac{190000}{31860} = 5,96$$

Площадь приведенного сечения:

$$A_{red} = bh + \alpha_{sp} A_{sp} = 100 \cdot 150 + 5,96 \cdot 154 = 15\,910 \text{ мм}^2$$

Статический момент площади приведенного сечения относительно нижней грани:

$$S_{red} = \frac{bh^2}{2} + \alpha_{sp} A_{sp} a_p = \frac{100 \cdot 150^2}{2} + 5,96 \cdot 154 \cdot 20 = 1\,143\,000 \text{ мм}^2$$

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до нижней грани:

$$Y_o = \frac{S_{red}}{A_{red}} = \frac{1143000}{15910} = 71,8 \text{ мм}$$

## Определение характеристик приведенного сечения

Рабочая высота сечения	$h_0=130$	мм
Ширина сечения	$b=100$	мм
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры $A_{sp}$	$a_p=20$	мм
Площадь поперечного сечения напрягаемой арматуры	$A_{sp}=154$	мм <sup>2</sup>
Модуль упругости бетона (по результатам опыта)	$E_b=31\ 860$	Н/мм <sup>2</sup>
Модуль упругости напрягаемой арматуры (А-V)	$E_{sp}=190\ 000$	Н/мм <sup>2</sup>
Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани	$Y_0=71,8$	мм
	$\varphi=1$	
	$\alpha_{sp}=5,96$	
Высота сечения	$h=150$	мм
Площадь приведенного сечения	$A_{red}=15\ 910$	мм <sup>2</sup>

Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести сечения:

$$I_{red} = \frac{bh^3}{12} + bh\left(Y_0 - \frac{h}{2}\right)^2 + \alpha_{sp} A_{sp} (Y_0 - a_p)^2 =$$

$$= \frac{100 \cdot 150^3}{12} + 100 \cdot 150 \cdot \left(71,8 - \frac{150}{2}\right)^2 + 5,96 \cdot 154 \cdot (71,8 - 20)^2 =$$

$$= 30\ 740\ 000 \text{ мм}^4$$

## Определение характеристик приведенного сечения

Площадь поперечного сечения напрягаемой арматуры	$A_{sp}=154$	мм <sup>2</sup>
Модуль упругости бетона (по результатам опыта)	$E_b=31\ 860$	Н/мм <sup>2</sup>
Модуль упругости напрягаемой арматуры (А-V)	$E_{sp}=190\ 000$	Н/мм <sup>2</sup>
Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани	$Y_0=71,8$	мм
	$\varphi=1$	
Площадь приведенного сечения	$A_{red}=15\ 910$	мм <sup>2</sup>
Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести	$I_{red}=30\ 740\ 000$	мм <sup>4</sup>

Момент сопротивления приведенного сечения относительно нижней грани:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{Y_0} = \frac{30740000}{71,8} = 428\ 100 \text{ мм}^3$$

Упруго-пластический момент сопротивления относительно нижней грани:

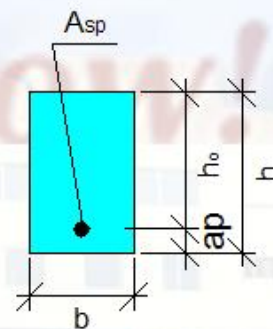
$$W_{pl} = 1,75W_{red} = 1,75 \cdot 428100 = 749\ 100 \text{ мм}^3$$

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до ядровой точки:

$$r = \frac{\varphi W_{pl}}{A_{red}} = \frac{1 \cdot 749100}{15910} = 47,1 \text{ мм}$$

## Определение потерь предварительного напряжения

Начальное предварительное напряжение	$\sigma_{sp}$	=669	Н/мм <sup>2</sup>
Передаточная прочность	$R_{bp}$	=28,7	Н/мм
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры $A_{sp}$	$a_p$	=20	мм
Площадь поперечного сечения напрягаемой арматуры	$A_{sp}$	=154	мм <sup>2</sup>
Площадь приведенного сечения	$A_{red}$	=15 910	мм <sup>2</sup>



### Первые потери

Потери от релаксации напряжений:  $\sigma_1 = 0,03\sigma_{sp} = 0,03 \cdot 669 = 20,1$  Н/мм<sup>2</sup>

Усилие предварительного обжатия с учетом потерь 1:

$$P_1 = A_{sp} (\sigma_{sp} - \sigma_1) = 154 \cdot (669 - 20,1) = 99\,930 \text{ Н}$$

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

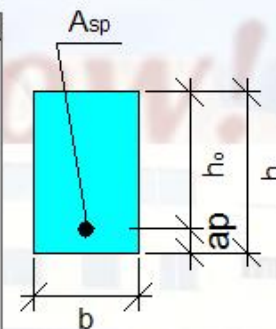
$$\sigma_{bp} = \frac{P_1}{A_{red}} + \frac{P_1(Y_0 - a_p)}{I_{red}} = \frac{99930}{15910} + \frac{99930 \cdot (71,8 - 20)}{30740000} = 6,4 \text{ Н/мм}^2$$

Потери от быстронатекающей ползучести:

$$\sigma_6 = \frac{40\sigma_{bp}}{R_{bp}} = \frac{40 \cdot 6,4}{28,7} = 8,92 \text{ Н/мм}^2$$

## Определение потерь предварительного напряжения

Площадь приведенного сечения	$A_{red}$	=15 910	мм <sup>2</sup>
Момент инерции приведенного сечения относительно центра тяжести	$I_{red}$	=30 740 000	мм <sup>4</sup>
Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани	$Y_0$	=71,8	мм
Потери от релаксации напряжений	$\sigma_1$	=20,1	Н/мм <sup>2</sup>
Напряжения в бетоне в уровне центра тяжести арматуры $A_{sp}$	$\sigma_{bp}$	=6,4	Н/мм <sup>2</sup>
Потери от быстронатекающей ползучести	$\sigma_6$	=8,92	Н/мм <sup>2</sup>



### Вторые потери

Потери от усадки бетона:  $\sigma_8 = 50$  Н/мм<sup>2</sup>

$$\text{Потери от ползучести: } \sigma_9 = \frac{150\sigma_{bp}}{R_{bp}} = \frac{150 \cdot 6,4}{28,7} = 33,4 \text{ Н/мм}^2$$

Полные потери:  $\sigma_{los} = \sigma_1 + \sigma_6 + \sigma_8 + \sigma_9 = 20,1 + 8,92 + 50 + 33,4 = 112,4$  Н/мм<sup>2</sup>

Усилие предварительного обжатия с учетом всех потерь:

$$P_2 = A_{sp} (\sigma_{sp} - \sigma_{los}) = 154 \cdot (669 - 112,4) = 85\,710 \text{ Н}$$

## Определение теоретического момента трещинообразования

Площадь поперечного сечения напрягаемой арматуры	$A_{sp}$	=154	мм <sup>2</sup>
Усилие предварительного обжатия с учетом всех потерь	$P_2$	=85 710	Н
Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до растянутой грани	$Y_0$	=71,8	мм
Упруго-пластический момент сопротивления сечения относительно нижней грани	$W_{pl}$	=749 100	мм <sup>2</sup>
Расстояние от ц. т. приведенного сечения до ядровой точки	$r$	=47,1	мм

Эксцентриситет усилия предварительного обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения:

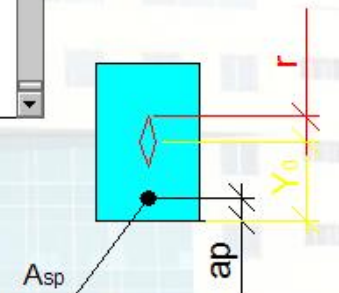
$$e_{op} = Y_0 - a_p = 71,8 - 20 = 51,8 \quad \text{мм}$$

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

$$M_{yp} = P_2(e_{op} + r) = 85710 \cdot (51,8 + 47,1) = 8\,476\,000 \quad \text{Н·мм}$$

Теоретический момент образования трещин:

$$M_{crc,cal} = R_{bt}W_{pl} + M_{yp} = 2,26 \cdot 749100 + 8476000 = 10\,160\,000 \quad \text{Н·мм}$$



## Определение теоретического разрушающего момента

Рабочая высота сечения	$h_0$	=130	мм
Ширина сечения	$b$	=100	мм
Прочность бетона сжатию	$R_b$	=26,9	Н/мм <sup>2</sup>
Сопротивление арматуры растяжению	$R_{sp}$	=777,3	Н/мм <sup>2</sup>
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры $A_{sp}$	$a_p$	=20	мм

Определение характеристики сжатой зоны бетона:

$$\omega = 0,85 \cdot 0,008 \cdot R_b = 0,85 \cdot 0,008 \cdot 26,9 = 0,635$$

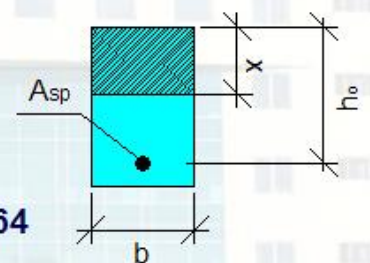
Граничное значение относительной высоты сжатой зоны:

$$\xi_R = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{sR}}{\sigma_{sc,u}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = \frac{0,635}{1 + \frac{437}{500} \left(1 - \frac{0,635}{1,1}\right)} = 0,464$$

Высота сжатой зоны в стадии разрушения без учета коэффициента  $\gamma_6$ :

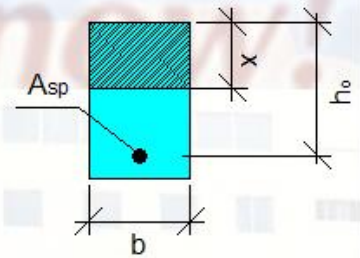
$$x = \frac{R_{sp} A_{sp}}{R_b b} = \frac{777,3 \cdot 154}{26,9 \cdot 100} = 44,5 \quad \text{мм}$$

Относительная высота сжатой зоны:  $\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{44,5}{130} = 0,342$



## Определение теоретического разрушающего момента

Рабочая высота сечения	$h_0 = 130$	мм
Ширина сечения	$b = 100$	мм
Прочность бетона сжатию	$R_b = 26,9$	Н/мм <sup>2</sup>
Сопротивление арматуры растяжению	$R_{sp} = 777,3$	Н/мм <sup>2</sup>
Расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры $A_{sp}$	$a_p = 20$	мм
Площадь поперечного сечения напрягаемой арматуры	$A_{sp} = 154$	мм <sup>2</sup>
Относительная высота сжатой зоны	$\xi = 0,342$	



Коэффициент условий работы для высокопрочной арматуры:

$$\gamma_{s6} = 1,15 - (1,15 - 1) \left( \frac{2\xi}{\xi_R} - 1 \right) = 1,15 - (1,15 - 1) \left( \frac{2 \cdot 0,342}{0,464} - 1 \right) = 1,08 < 1,15$$

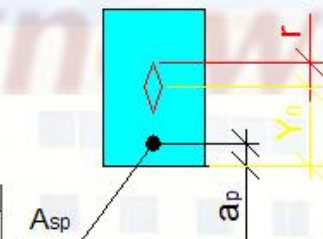
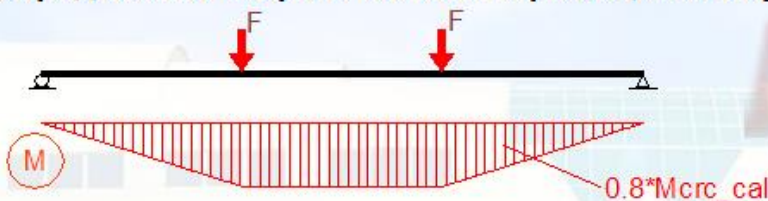
Высота сжатой зоны в стадии разрушения с учетом коэффициента  $\gamma_{s6}$ :

$$x = \frac{\gamma_{s6} R_{sp} A_{sp}}{R_b b} = \frac{1,08 \cdot 777,3 \cdot 154}{26,9 \cdot 100} = 48,1 \text{ мм}$$

Теоретическое значение разрушающего момента:

$$M_{ul,cal} = R_b b x \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) = 26,9 \cdot 100 \cdot 48,1 \cdot \left( 130 - \frac{48,1}{2} \right) = 13\,700\,000 \text{ Н·мм}$$

## Определение теоретического перемещения середины пролета



Модуль упругости бетона	$E_b = 31\,860$	Н/мм <sup>2</sup>
Расчетный пролет балки	$L_0 = 1\,170$	мм
Момент инерции приведенного сечения	$I_{red} = 30\,740\,000$	мм <sup>4</sup>
Теоретический момент образования трещин	$M_{crc,cal} = 10\,160\,000$	Н·мм

Кривизна продольной оси, обусловленная перемещением от внешней нагрузки, отвечающей уровню загрузки, при котором отсутствуют трещины, т.е.  $0,8M_{crc,cal}$

$$1/r = \frac{0,8M_{crc,cal}}{0,85E_b I_{red}} = \frac{0,8 \cdot 10\,160\,000}{0,85 \cdot 31\,860 \cdot 30\,740\,000} = 0,00000976 \text{ 1/мм}$$

Теоретическое перемещение от внешней нагрузки:

$$f_{cal} = \frac{23}{216} \cdot \frac{1}{r} \cdot L_0^2 = \frac{23}{216} \cdot 0,00000976 \cdot 1170^2 = 1,39 \text{ мм}$$

## Нагрузки на балку при испытании

Высота сечения	$h =$	150	мм
Ширина сечения	$b =$	100	мм
Расчетный пролет балки	$L_0 =$	1 170	мм
Теоретический момент образования трещин	$M_{cr,cal} =$	10 160 000	Н·мм
Теоретическое значение разрушающего момента	$M_{ul,cal} =$	13 700 000	Н·мм

Вес загрузочных устройств:  $P = 200$  Н

Собственный вес балки:  $G = b \cdot h \cdot \gamma \cdot g = 100 \cdot 150 \cdot 25 \cdot 0,00981 = 3679$  Н/мм

Нагрузка, соответствующая теоретическому моменту трещинообразования:

$$F_{cr,cal} = \frac{3M_{cr,cal}}{L_0} - \frac{3GL_0}{8} - 0,5P = \frac{3 \cdot 10160000}{1170} - \frac{3 \cdot 3679 \cdot 1170}{8} - 0,5 \cdot 200 = 25780 \text{ Н}$$

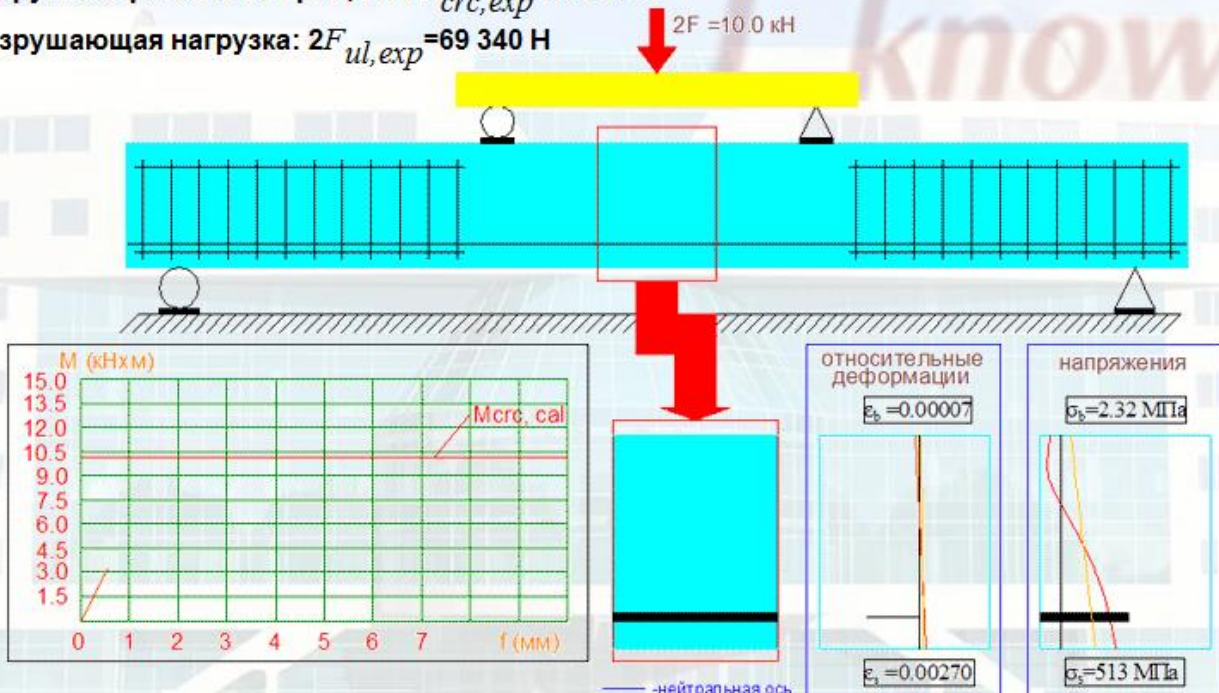
Нагрузка, соответствующая теоретическому разрушающему моменту:

$$F_{ul,cal} = \frac{3M_{ul,cal}}{L_0} - \frac{3GL_0}{8} - 0,5P = \frac{3 \cdot 13700000}{1170} - \frac{3 \cdot 3679 \cdot 1170}{8} - 0,5 \cdot 200 = 34860 \text{ Н}$$

## Испытание балки

Нагрузка образования трещин:  $2F_{cr,exp} = 43340$  Н

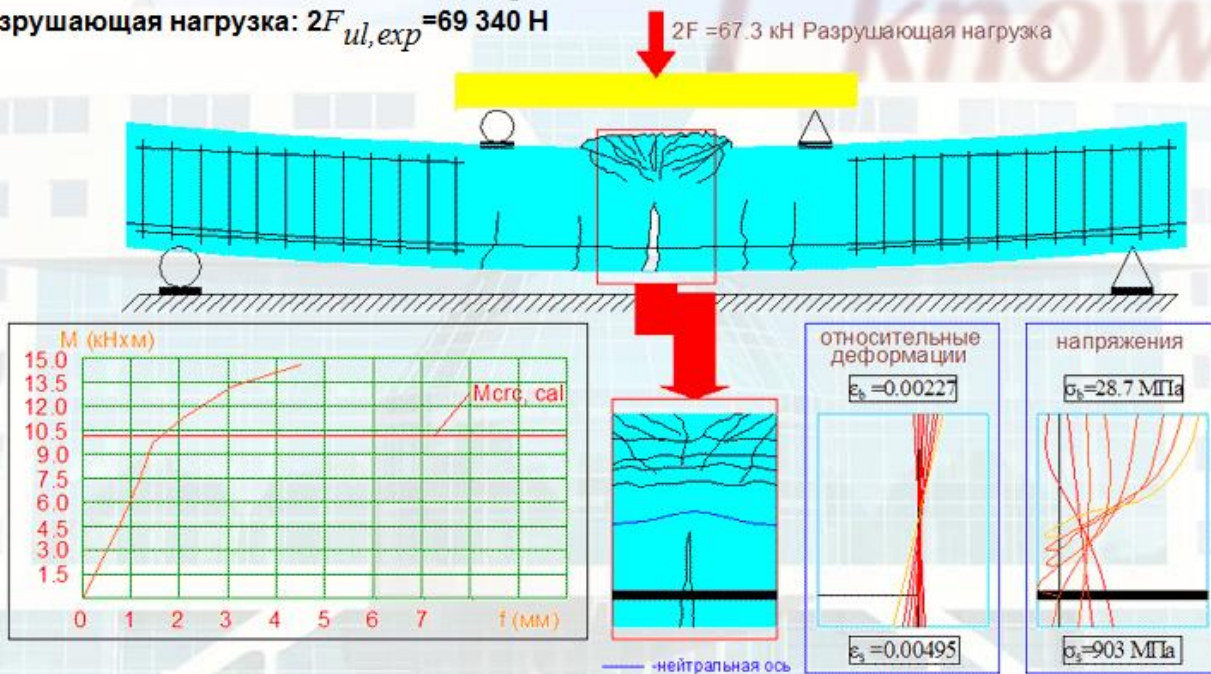
Разрушающая нагрузка:  $2F_{ul,exp} = 69340$  Н



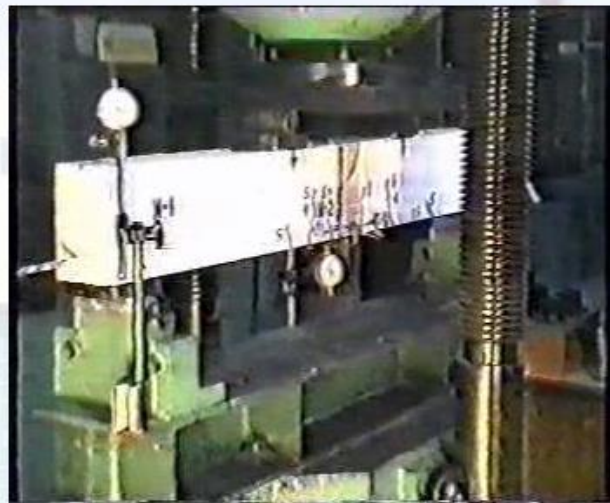
## Испытание балки

Нагрузка образования трещин:  $2F_{cr,exp} = 43\,340\text{ Н}$

Разрушающая нагрузка:  $2F_{ul,exp} = 69\,340\text{ Н}$



## Испытание балки



Испытание балки проводится с помощью гидравлического пресса. Непосредственно перед испытанием боковые грани покрывают побелкой, чтобы лучше видеть трещины. Нагрузка на балку через распределительную траверсу передается в двух точках в третях пролета.

Нагрузка на балку прикладывается ступенями, составляющими примерно 10% от ожидаемой нагрузки трещинообразования и контролируется по шкале силоизмерителя гидравлического пресса. После каждой ступени загрузки дается выдержка в течении 5-10 минут. За это время снимаются показания приборов, осуществляется визуальный осмотр балки и фиксируются трещины на поверхности бетона.

По мере увеличения нагрузки в средней части балки, в зоне чистого изгиба, начинают

## Сопоставление теоретических и экспериментальных значений

Вес загрузочных устройств	$P=$	200	H
Собственный вес балки	$G=$	,3679	H/мм
Расчетный пролет балки	$L_0=$	1170	мм
Теоретический момент образования трещин	$M_{crc,cal}=$	10160000	H·мм

**Определение опытного момента трещинообразования и сравнение его с теоретическим**

Нагрузка, отвечающая моменту трещинообразования:  $F_{crc,exp} = 21\,670$  H

Опытный момент трещинообразования:

$$M_{crc,exp} = (F_{crc,exp} + 0,5P) \frac{L_0}{3} + \frac{GL_0^2}{8} = \left( \frac{21670}{\text{H}} + 0,5 \cdot \frac{200}{\text{H}} \right) \frac{1170}{3} + \frac{0,3679 \cdot 1170^2}{8} = 8\,553\,000 \text{ H·мм}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{M_{crc,cal} - M_{crc,exp}}{M_{crc,cal}} \cdot 100\% = \frac{10160000 - 8553000}{10160000} \cdot 100\% = 15,82 \%$$

## Сопоставление теоретических и экспериментальных значений

Вес загрузочных устройств	$P=$	200	H
Собственный вес балки	$G=$	,3679	H/мм
Расчетный пролет балки	$L_0=$	1170	мм

**Определение опытного разрушающего момента и сравнение его с теоретическим**

Опытный момент трещинообразования:  $M_{ul,cal} = 13\,700\,000$  H·мм

Нагрузка, отвечающая разрушающему моменту:  $F_{ul,exp} = 34\,670$  H

Опытный разрушающий момент:

$$M_{ul,exp} = (F_{ul,exp} + 0,5P) \frac{L_0}{3} + \frac{GL_0^2}{8} = \left( \frac{34670}{\text{H}} + 0,5 \cdot \frac{200}{\text{H}} \right) \frac{1170}{3} + \frac{0,3679 \cdot 1170^2}{8} = 13\,623\,000 \text{ H·мм}$$

Величина отклонения в %:

$$\frac{M_{ul,cal} - M_{ul,exp}}{M_{ul,cal}} \cdot 100\% = \frac{13700000 - 13623000}{13700000} \cdot 100\% = 0,56 \%$$



## Сопоставление теоретических и экспериментальных значений

Сравнение опытного перемещения середины пролета с теоретическим значением

Теоретическое перемещение  $f_{cal} = 1,39$  мм

Экспериментальное перемещение:  $f_{exp} = 1,2$  мм

Величина отклонения в %:

$$\frac{f_{cal} - f_{exp}}{f_{cal}} \cdot 100\% = \frac{1,39 - 1,2}{1,39} \cdot 100\% = 13,7 \%$$