

NDM R1

Руководство пользователя

Приложение: NDM

Версия: R1

Описание: Диаграммный метод расчета плоских железобетонных сечений

Дата: 2024-02-09

Разработка: <https://constructionlab.ru>

E-mail: support@constructionlab.ru

Содержание

1	Сечение	5
1.1	Бетон.....	5
1.2	Геометрия.....	5
1.3	Ненапрягаемая арматура.....	7
1.4	Напрягаемая арматура.....	8
1.5	Генерация стержней	8
2	Параметры.....	10
2.1	Опции	10
2.2	Влияние продольного изгиба	10
2.3	Управление расчетом	10
2.4	Графика.....	11
3	Прочность	12
3.1	Таблица расчетных сочетаний усилий	12
3.2	Параметры.....	13
4	Трещиностойкость	15
4.1	Таблица расчетных сочетаний усилий	15
4.2	Параметры.....	15
5	Длительная ползучесть.....	17
5.1	Таблица расчетных сочетаний усилий	17
5.2	Параметры.....	17
6	Импорт DXF.....	18
6.1	Общие положения	18
6.2	Импорт стандартного сечения.....	18
6.3	Импорт произвольного сечения.....	20
7	Диаграммы деформирования тяжелого бетона	22
7.1	Общие положения	22
7.2	Криволинейные диаграммы деформирования тяжелого бетона.....	22
7.3	Трехлинейные диаграммы деформирования тяжелого бетона	28

7.4	Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона при сжатии	30
8	Диаграммы деформирования арматуры	38
8.1	Общие положения	38
8.2	Криволинейные диаграммы деформирования арматуры	38
8.3	Кусочно-линейные диаграммы деформирования арматуры	45
8.4	Нормативные диаграммы деформирования арматуры с условным пределом текучести	47
8.5	Нормативные диаграммы деформирования арматуры с физической площадкой текучести	56
9	Верификационные задачи	59
9.1	Общие пояснения к верификационным задачам	59
9.2	Бетонные и железобетонные конструкции без предварительно напряженной арматуры.....	60
9.3	Предварительно напряженные железобетонные конструкции	136
10	Литература.....	187

1 Сечение

1.1 Бетон

Класс бетона по прочности на сжатие:

- B7,5, B10, B12,5, B15, B20, B25, B30, B35, B40, B45, B50, B55, B60, B70, B80, B90, B100.

1.2 Геометрия

Сечение – прямоугольное, тавровое, двутавровое, круглое, кольцевое, произвольное.

Прямоугольное сечение:

- b – ширина сечения, мм;
- h – высота сечения, мм.

Тавровое сечение:

- b – ширина ребра, мм;
- h – полная высота сечения, мм;
- b'_f – ширина полки, мм;
- h'_f – высота полки, мм.

Двутавровое сечение:

- b – ширина ребра, мм;
- h – полная высота сечения, мм;
- b'_f – ширина верхней полки, мм;
- h'_f – высота верхней полки, мм;
- b_f – ширина нижней полки, мм;
- h_f – высота нижней полки, мм.

Круглое сечение:

- D – диаметр сечения, мм.

Кольцевое сечение:

- D_{ext} – внешний диаметр сечения, мм;
- D_{int} – внутренний диаметр сечения, мм;
-

Элементы – генерация сети элементов:

- по оси Y ;
- по оси Z .

Импорт DXF – импорт геометрии сечения из DXF (см. отдельное руководство).

Генерация сечения – графическое отображение введенных данных.

Примеры ввода данных:

- Прямоугольное сечение с размерами 400×800 мм, сеть элементов 10×10 мм:

Геометрия	
Сечение	прямоугольное ▾
b / h	<input type="text" value="400"/> <input type="text" value="800"/> мм
b_f / h_f	<input type="text"/> <input type="text"/> мм
D	<input type="text"/> мм
Элементы	<input type="text" value="10"/> <input type="text" value="10"/> мм
САПР	<input type="button" value="Импорт DXF"/>
Генерация	<input type="button" value="Сечение"/>

- Тавровое сечение: ширина ребра – 300 мм, полная высота сечения – 500 мм, ширина полки – 1500 мм, высота полки – 200 мм, сеть элементов 10x10 мм:

Геометрия	
Сечение	тавровое ▾
b / h	<input type="text" value="300"/> <input type="text" value="500"/> мм
b_f / h_f	<input type="text" value="1500"/> <input type="text" value="200"/> мм
D	<input type="text"/> мм
Элементы	<input type="text" value="10"/> <input type="text" value="10"/> мм
САПР	<input type="button" value="Импорт DXF"/>
Генерация	<input type="button" value="Сечение"/>

- Круглое сечение диаметром 800 мм, средние размер сети элементов 10x10 мм:

Геометрия	
Сечение	круглое ▾
b / h	<input type="text"/> <input type="text"/> мм
b_f / h_f	<input type="text"/> <input type="text"/> мм
D	<input type="text" value="800"/> мм
Элементы	<input type="text" value="10"/> <input type="text"/> мм
САПР	<input type="button" value="Импорт DXF"/>
Генерация	<input type="button" value="Сечение"/>

- Произвольное сечение – только импорт DXF (см. отдельное руководство):

Геометрия	
Сечение	произвольное ▾
b / h	<input type="text"/> <input type="text"/> мм
b_f / h_f	<input type="text"/> <input type="text"/> мм
D	<input type="text"/> мм
Элементы	<input type="text"/> <input type="text"/> мм
САПР	Импорт DXF
Генерация	Сечение

1.3 Ненапрягаемая арматура

Класс ненапрягаемой арматуры по прочности на растяжение:

- A240, A400, A500, A600, B500, Bp500.

Функционал:

- добавление или удаление строк;
- назначение одинаковых значений выделенным ячейкам.

За **начало координат** приняты следующие узлы:

- прямоугольное сечение – левый нижний узел;
- тавровое сечение – левый нижний узел ребра;
- двутавровое сечение – левый нижний узел;
- круглое сечение – центр окружности.

При импорте произвольного сечения из DXF за начало координат принимается первый узел контура сечения.

Пример ввода данных:

- Прямоугольное сечение с размерами 400×400 мм, арматура углового типа – 4Ø25 A500, $a = a' = 50$ мм:

Ненапрягаемая арматура

Класс: A500

	Y, мм	Z, мм	d, мм
1	50	50	25
2	350	50	25
3	50	350	25
4	350	350	25

Добавить Удалить

Назначить

Графика

Ненапрягаемая арматура окрашивается в синий цвет.

1.4 Напрягаемая арматура

Класс напрягаемой арматуры по прочности на растяжение:

- A600, A800, A1000, Bp1200, Bp1300, Bp1400, Bp1500, Bp1600, K1400, K1450, K1500, K1550, K1650, K1750, K1850, K1900.

σ_{sp} – предварительное напряжение арматуры с учетом потерь, отвечающих рассматриваемой расчетной ситуации, МПа. Действует условное ограничение: $\sigma_{sp} \leq 0,9 R_{s,n}$.

Функционал:

- добавление или удаление строк;
- назначение одинаковых значений выделенным ячейкам.

Ввод данных аналогичен вводу ненапрягаемой арматуры. Напрягаемая арматура окрашивается в красный цвет.

1.5 Генерация стержней

Доступен ввод цепочки стержней ненапрягаемой или напрягаемой арматуры по линии или по окружности.

При вводе цепочки стержней по линии:

- начальная точка ряда с координатами Y_1, Z_1 , мм;
- конечная точка ряда с координатами Y_2, Z_2 , мм.

При вводе цепочки стержней по окружности:

- D – диаметр окружности ряда стержней, мм;
- β – сдвиг первого стержня вдоль окружности, град.

Цепочка стержней:

- d_s – диаметр ряда стержней, мм;
- n_s – количество стержней, шт.

Пример ввода данных:

- Прямоугольное сечение с размерами 1000×200 мм, нижняя арматура – 5 \emptyset 12, $a = 40$ мм:

Генерация стержней

Арматура: ненапрягаемая ▾

Положение: по линии ▾

Y_1 / Z_1 : 50 40 мм

Y_2 / Z_2 : 950 40 мм

D : мм

d_s : 12 мм ▾

n_s : 5 шт. ▾

Стержни Добавить

Графика

2 Параметры

2.1 Опции

Единицы измерения – единицы измерения усилий в таблицах расчетных сочетаний.

g – ускорение свободного падения, m/s^2 . Внутрипрограммные расчеты выполняются в Н и мм; при выборе единиц измерения расчетных сочетаний усилий в тс – конвертация происходит умножением на коэффициент g.

Точность – точность итерационных вычислений, %. Характеризует максимальную погрешность относительных деформаций и внутренних усилий текущей итерации от предыдущей.

Поиск – шаг нагрузки для поиска момента трещинообразования, %.

Итерации – максимальное количество итераций (для одного шага), шт.

Округление – количество разрядов для округления усилий в таблицах расчетных сочетаний.

2.2 Влияние продольного изгиба

L_z, L_y – длина элемента в плоскости, соответственно, XOZ (для корректировки изгибающих моментов M_y) и XOY (для корректировки изгибающих моментов M_z), мм.

μ_z, μ_y – коэффициент расчетной длины в плоскости, соответственно, XOZ (для корректировки изгибающих моментов M_y) и XOY (для корректировки изгибающих моментов M_z).

e_z, e_y – дополнительный эксцентриситет продольной сжимающей силы в плоскости, соответственно, XOZ (для корректировки изгибающих моментов M_y) и XOY (для корректировки изгибающих моментов M_z), например, от температурного воздействия, мм.

Схема – статически неопределимая или статически определимая (для учета случайного эксцентриситета продольной сжимающей силы).

2.3 Управление расчетом

Влияние градиентов деформаций – учет влияния градиентов деформаций на диаграмму состояния бетона. Рекомендуется активировать при высоте сжатой зоны бетона от 0,2 до 0,5 от рабочей высоты сечения.

Крошение сжатого бетона – расчет без ограничения предельных относительных деформаций бетона при сжатии. Элементы бетона, относительные деформации которых при сжатии превышают предельные, полагаются выключенными из работы, расчет не прерывается.

Одновременный учет коэффициента ψ_s и растянутого бетона – учет работы растянутого бетона при использовании коэффициента ψ_s .

2.4 Графика

Координатные оси – отображение или выключение координатных осей.

Сеть элементов – отображение или выключение сети элементов.

Номера стержней арматуры – отображение или выключение номеров стержней арматуры.

Напряжения в арматуре – отображение или выключение напряжений в арматуре, МПа.

Центр жесткости – отображение или выключение центра жесткости нагруженного сечения.

3 Прочность

3.1 Таблица расчетных сочетаний усилий

Режимы:

- кратковременный;
- длительный.

В режиме длительной прочности автоматически учитывается коэффициент условий работы бетона 0,9. При учете влияния продольного изгиба коэффициент $\varphi_1 = 2,0$ (в кратковременном режиме коэффициент задается пользователем – от 1,0 до 2,0).

Правило знаков усилий:

- отрицательная продольная сила N создает сжимающие напряжения в сечении;
- положительный изгибающий момент M_y растягивает нижнюю грань сечения;
- положительный изгибающий момент M_z растягивает правую грань сечения.

Основные принципы работы с таблицами расчетных сочетаний усилий:

- добавление или удаление строк;
- назначение одинаковых значений выделенным ячейкам;
- округление расчетных сочетаний усилий.

При активации расчета таблица блокируется. Для возврата в режим редактирования необходимо активировать кнопку «Редактировать», при этом результаты удаляются.

В столбце «Решение» приводится коэффициент использования сжатого бетона (с индексом «b») или относительный коэффициент использования растянутой арматуры (с индексом «s» для ненапрягаемой или «sr» для напрягаемой арматуры). Если коэффициент оказывается больше единицы, тогда в сечении зафиксировано крошение сжатого бетона или наличие остаточных деформаций в арматуре. В любом случае рекомендуется анализировать жесткостные характеристики нагруженного сечения.

Для отображения графического результата конкретного сочетания усилий необходимо нажать кнопку определенной строки столбца «Решение».

Загрузка результатов в столбец «k»:

- ϵ_x – осевая деформация в центре жесткости нагруженного сечения, д.ед.;
- $1/r_y$ – кривизна вокруг оси Y относительно центра жесткости нагруженного сечения, $1/m$;
- $1/r_z$ – кривизна вокруг оси Z относительно центра жесткости нагруженного сечения, $1/m$;
- $\epsilon_{b,max}$ – максимальная относительная деформация в бетоне, д.ед.;
- $\epsilon_{b,min}$ – минимальная относительная деформация в бетоне, д.ед.;

- $\sigma_{b,max}$ – максимальное напряжение в бетоне, МПа;
- $\sigma_{b,min}$ – минимальное напряжение в бетоне, МПа;
- $\sigma_{b,m}$ – среднее напряжение в бетоне (без учета площади трещины), МПа;
- $\epsilon_{s,max}$ – максимальная относительная деформация в ненапрягаемой арматуре, д.ед.;
- $\epsilon_{s,min}$ – минимальная относительная деформация в ненапрягаемой арматуре, д.ед.;
- $\sigma_{s,max}$ – максимальное напряжение в ненапрягаемой арматуре, МПа;
- $\sigma_{s,min}$ – минимальное напряжение в ненапрягаемой арматуре, МПа;
- $\epsilon_{sp,max}$ – максимальная относительная деформация в напрягаемой арматуре, д.ед.;
- $\epsilon_{sp,min}$ – минимальная относительная деформация в напрягаемой арматуре, д.ед.;
- $\sigma_{sp,max}$ – максимальное напряжение в напрягаемой арматуре, МПа;
- $\sigma_{sp,min}$ – минимальное напряжение в напрягаемой арматуре, МПа;
- D_{xx} – осевая жесткость нагруженного сечения, кН;
- D_{yy} – изгибная жесткость нагруженного сечения вокруг оси Y, кН·м²;
- D_{zz} – изгибная жесткость нагруженного сечения вокруг оси Z, кН·м²;
- D_{yz} – жесткость нагруженного сечения относительно осей Y и Z, кН·м²;
- $k-D_{xx}$ – отношение осевой жесткости нагруженного сечения к осевой жесткости бетонного сечения (без учета арматуры), д.ед.;
- $k-D_{yy}$ – отношение изгибной жесткости нагруженного сечения вокруг оси Y к изгибной жесткости бетонного сечения (без учета арматуры), д.ед.;
- $k-D_{zz}$ – отношение изгибной жесткости нагруженного сечения вокруг оси Y к изгибной жесткости бетонного сечения (без учета арматуры), д.ед.

3.2 Параметры

Диаграммы состояния материалов:

- кусочно-линейные;
- криволинейные.

Коэффициенты условий работы:

- γ_{bc} – сжатого бетона;
- γ_{bt} – растянутого бетона;
- γ_s – ненапрягаемой арматуры;
- γ_{sp} – напрягаемой арматуры.

Работа бетона между трещинами – учет коэффициента ψ_s при необходимости уточнения жесткости сечения.

Фиксировать N – определение момента трещинообразования происходит при фиксированной (заданной) продольной силе. Функция актуальна, например, при расчете ж.б. колонн одноэтажных промышленных зданий.

Нормативные характеристики – использование в расчетах нормативных характеристик материалов. Функция актуальна, например, при расчете на некоторые виды особых воздействий.

Ограничение сжимающих напряжений в арматуре – учет R_{sc} .

Учет влияния продольного изгиба:

- в плоскости XOZ (для корректировки изгибающих моментов M_y);
- в плоскости XOY (для корректировки изгибающих моментов M_z).

Учет вектора эксцентриситетов – условная критическая сила рассчитывается с введением вектора изгибающих моментов в каждой плоскости. Далее полученные изгибающие моменты раскладываются по плоскостям пропорционально действующим.

Учет влияния продольного изгиба производится по методике критических сил в соответствии с СП 63.13330.2018.

4 Трещиностойкость

4.1 Таблица расчетных сочетаний усилий

Основная функциональность таблицы расчетных сочетаний усилий аналогична таблице из прочностного расчета. Для отображения графического результата продолжительного или непродолжительного сочетания усилий необходимо выбрать соответствующее значение из выпадающего списка.

Марки усилий:

- sh – усилий от непродолжительных (условно кратковременных) нагрузок;
- l – усилия от продолжительный (условно длительных) нагрузок.

4.2 Параметры

Диаграммы состояния материалов:

- кусочно-линейные;
- криволинейные.

Коэффициенты условий работы:

- γ_{bc} – сжатого бетона;
- γ_{bt} – растянутого бетона;
- γ_s – ненапрягаемой арматуры;
- γ_{sp} – напрягаемой арматуры.

Учет коэффициента ψ_s – учет момента трещинообразования при определении ширины раскрытия трещин.

Фиксировать N_{sh} – определение момента трещинообразования происходит при фиксированной (заданной) продольной силе от непродолжительных (условно кратковременных) нагрузок. Функция актуальна, например, при расчете ж.б. колонн одноэтажных промышленных зданий.

Характеристики материалов как для расчета по прочности – использование в расчетах характеристик материалов как для 1-ой группы предельных состояний. Функция актуальна для зданий и сооружений с повышенными требованиями трещиностойкости.

Отсутствие трещин – анализ только наличия или отсутствия трещин в сечении.

Предельная ширина раскрытия трещин:

- $a_{s,crc,ult}$ – предельная ширина продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин в ненапрягаемой арматуре;
- $a_{sp,crc,ult}$ – предельная ширина продолжительного и непродолжительного раскрытия трещин в напрягаемой арматуре;

- $d_{crc(s/sp)}$ – расчетный (приведенный) диаметр ненапрягаемой и напрягаемой арматуры при определении ширины раскрытия трещин. Вводится дополнительно при невозможности учета некоторых способов конструирования – при наличии пучков арматурных стержней, арматурных канатов в оболочках и т.д.

5 Длительная ползучесть

5.1 Таблица расчетных сочетаний усилий

Основная функциональность таблицы расчетных сочетаний усилий аналогична таблице из прочностного расчета.

5.2 Параметры

Диаграммы состояния материалов:

- кусочно-линейные;
- криволинейные.

Коэффициенты условий работы:

- γ_{bc} – сжатого бетона;
- γ_{bt} – растянутого бетона;
- γ_s – ненапрягаемой арматуры;
- γ_{sp} – напрягаемой арматуры.

Работа бетона между трещинами – учет коэффициента ψ_s при необходимости уточнения жесткости сечения.

Фиксировать N – определение момента трещинообразования происходит при фиксированной (заданной) продольной силе. Функция актуальна, например, при расчете ж.б. колонн одноэтажных промышленных зданий.

Характеристики материалов как для расчета по прочности – использование в расчетах характеристик материалов как для 1-ой группы предельных состояний.

φ_{int} – относительная влажность воздуха окружающей среды, %.

При учете криволинейных диаграмм состояния бетона:

- **Режимы:**
 - жесткий – нагрузка прикладывается мгновенно в возрасте бетона t_0 , сут.;
 - мягкий – нагрузка прикладывается возрастающими напряжениями или деформациями.
- t_0 – возраст бетона в момент приложения нагрузки, $t_0 \geq 7$ сут.
- M_0 – модуль открытой поверхности, 1/м.

6 Импорт DXF

6.1 Общие положения

Описание импорта сечений из формата DXF выполнено на базе nanoCAD.

Наименования слоев и типы элементов:

- **RC_Sec** – контур сечения, замкнутая полилиния;
- **RC_R** – ненапрягаемая арматура, круги;
- **RC_PSR** – напрягаемая арматура, круги;
- **RC_Mesh** – сеть элементов, замкнутая полилиния (для произвольного сечения).

Основные требования:

- контур сечения должен быть выполнен замкнутой полилинией;
- количество вершин сечения должно соответствовать выбранному типу: например, у прямоугольного сечения должно быть 4 вершины (при замыкании полилинии возможно образование точек с одинаковыми координатами);
- при импорте произвольного сечения следует нанести сеть из замкнутых треугольников или четырехугольников (слой RC_Mesh);
- геометрическая точность построений.

6.2 Импорт стандартного сечения

Выполним импорт прямоугольного сечения предварительно напряженной балки сечением 300×800 мм:

- напрягаемая арматура в нижней зоне 2Ø25, расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры 50 мм;
- ненапрягаемая арматура в верхней зоне 2Ø16, расстояние от верхней грани сечения до центра тяжести арматуры 50 мм.

Сечение представлено на рисунке 6.1 – контур сечения, напрягаемая и ненапрягаемая арматура заданы, соответственно, в слоях – RC_Sec, RC_PSR, RC_R.

При разработке сечения необходимо соблюдать основные требования, указанные выше, в том числе контролировать:

- наименования слоев;
- количество вершин полилинии контура сечения;
- замыкание полилинии контура сечения;
- параллельность граней сечения.

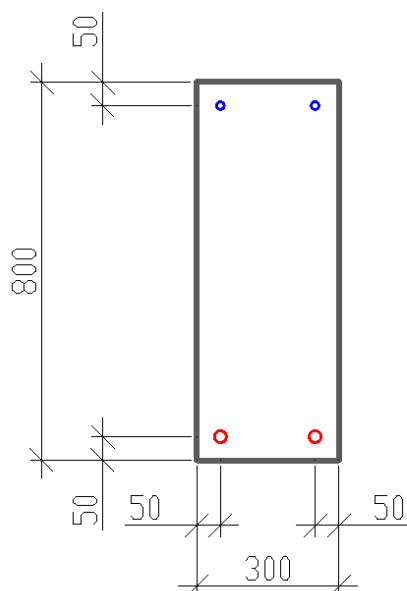


Рисунок 6.1 – Прямоугольное сечение для импорта

Для экспорта сечения в формат DXF необходимо выделить элементы сечения и набрать в командной строке команду «**ПБЛОК**» или «**_wblock**» (см. рисунок 6.2).

Положение сечения в пространстве значения не имеет. Рекомендуется, чтобы координаты узлов элементов были кратны целому числу миллиметров.

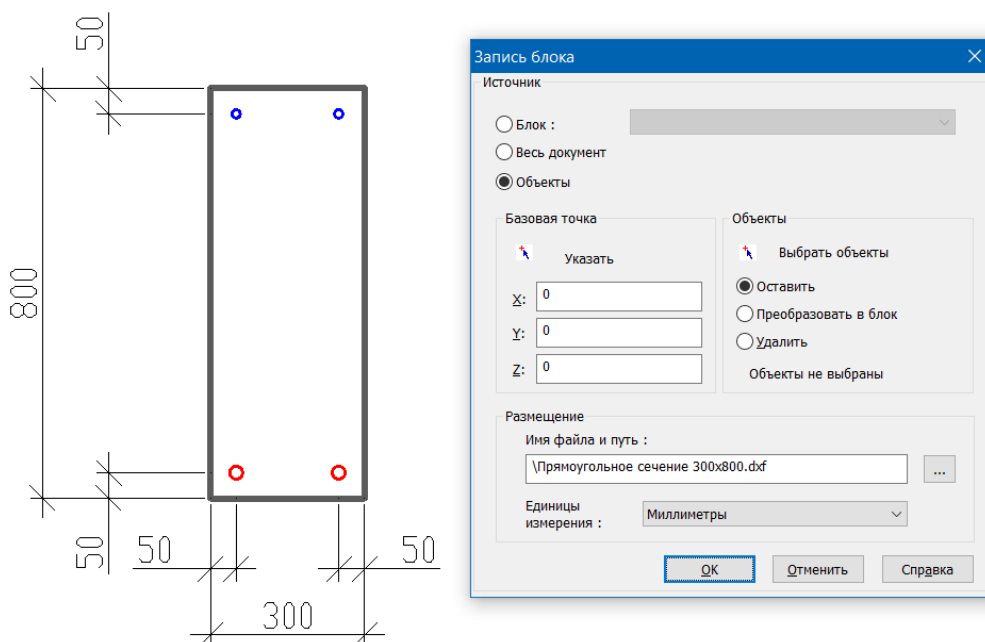


Рисунок 6.2 – Экспорт сечения в формат DXF

Далее в приложении NDM необходимо выбрать прямоугольный тип сечения и активировать «Импорт DXF».

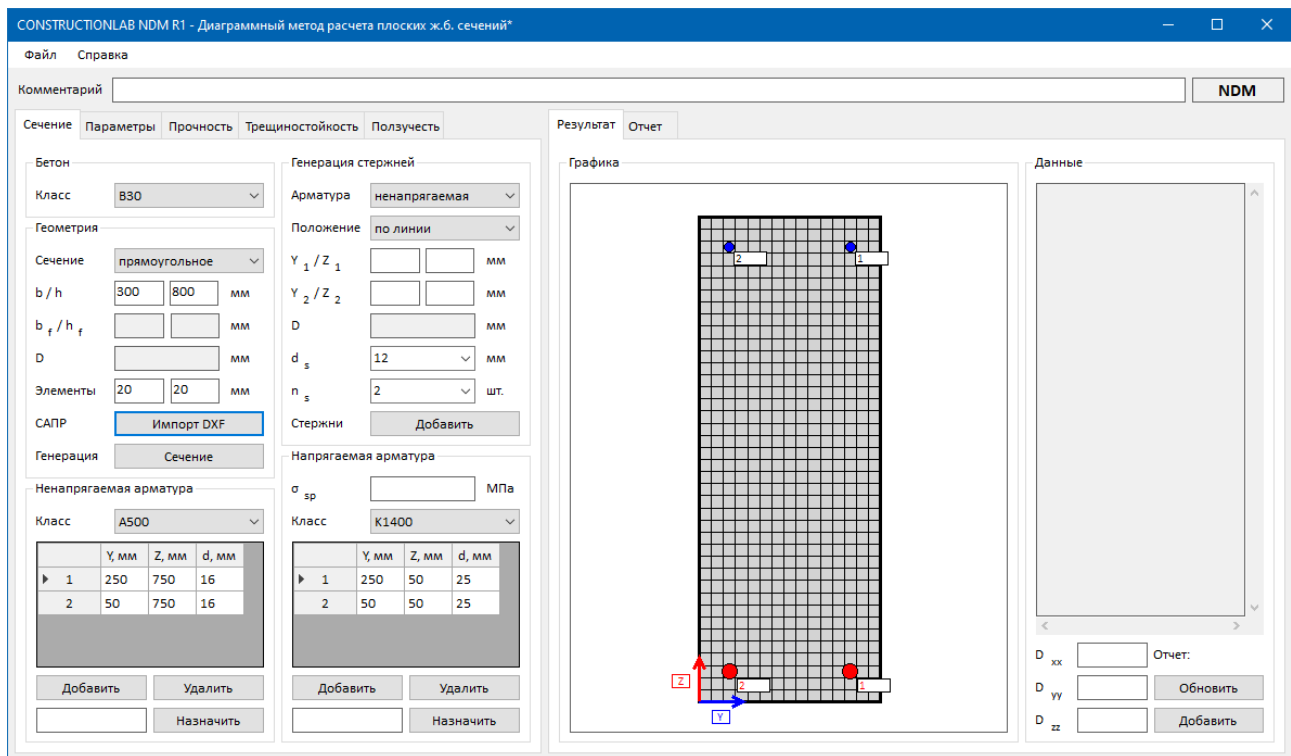


Рисунок 6.3 – Результат импорта прямоугольного сечения из формата DXF

6.3 Импорт произвольного сечения

Выполним импорт таврового сечения со скошенными гранями предварительно напряженной балки с сечением ребра 400×400 мм и сечением полки 200×800 мм:

- напрягаемая арматура в нижней зоне 2Ø25, расстояние от нижней грани сечения до центра тяжести арматуры 50 мм;
- ненапрягаемая арматура в верхней зоне 4Ø16, расстояние от верхней грани сечения до центра тяжести арматуры 50 мм.

Сечение представлено на рисунке 6.4 – контур сечения, напрягаемая и ненапрягаемая арматура заданы, соответственно, в слоях – RC_Sec, RC_PSR, RC_R; сеть элементов представлена замкнутыми треугольниками и четырехугольниками с габаритными размерами 25×25 мм – слой RC_Mesh.

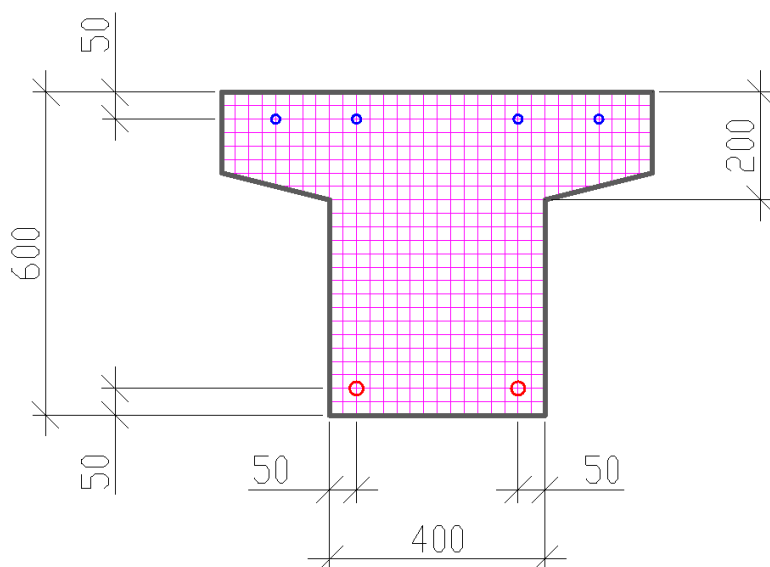


Рисунок 6.4 – Произвольное сечение для импорта

Для экспорта сечения в формат DXF необходимо выделить элементы сечения и набрать в командной строке команду «**ПБЛОК**» или «**_wblock**».

Далее в приложении NDM необходимо выбрать произвольный тип сечения и активировать «Импорт DXF».

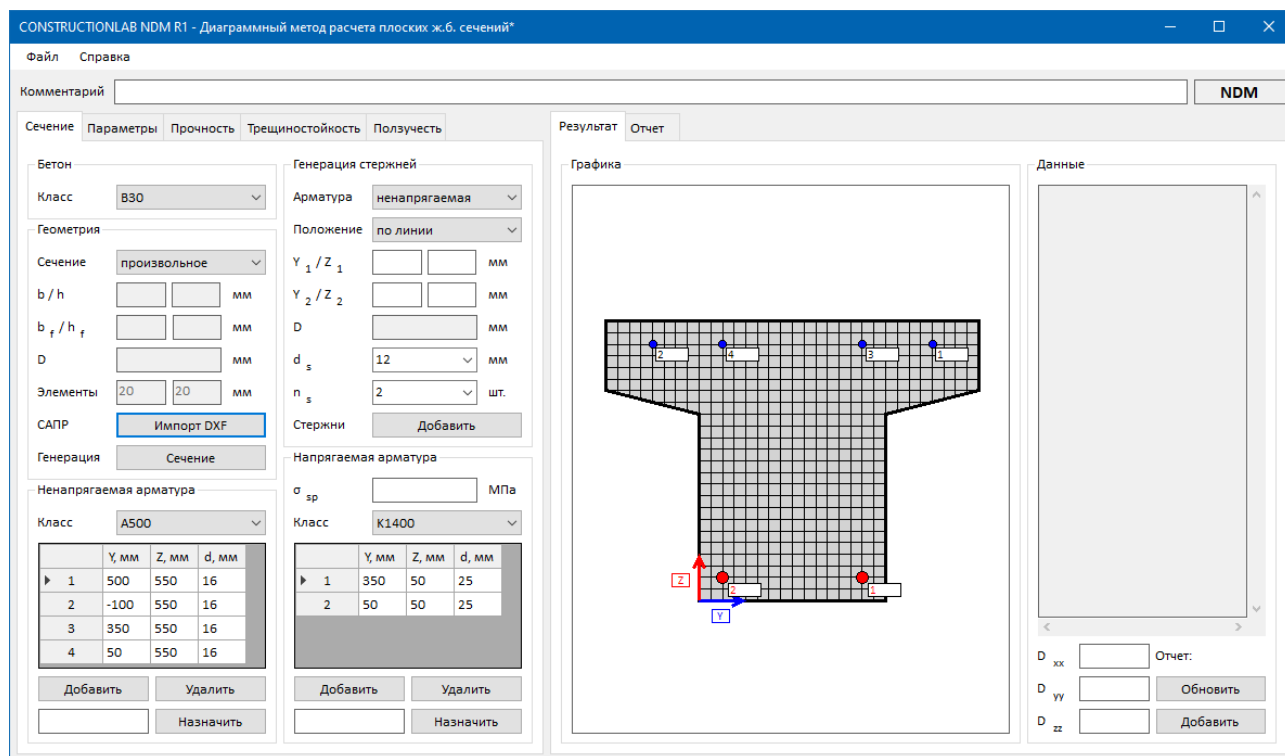


Рисунок 6.5 – Результат импорта произвольного сечения из формата DXF

7 Диаграммы деформирования тяжелого бетона

7.1 Общие положения

Диаграммы деформирования тяжелого бетона в приложении NDM представлены двух видов:

- трехлинейные в соответствии с СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (с изменениями № 1 и 2) [1];
- криволинейные в соответствии с методическим пособием «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии», разработанным ФАУ «ФЦС» [2], в том числе криволинейные диаграммы-изохроны с учетом длительной ползучести.

Основные механические и деформационные характеристики бетона принимаются по [1]. В данном руководстве приводятся только нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона. Для перехода к расчетным диаграммам необходимо нормативные сопротивления бетона заменить на расчетные.

7.2 Криволинейные диаграммы деформирования тяжелого бетона

Кратковременное нагружение

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при **сжатии** и кратковременном нагружении принимается в следующем виде (см. рисунок 7.1):

$$\varepsilon_{bc} = \frac{\sigma_{bc}}{E_b \nu_{bc}}, \quad (7.1)$$

где ε_{bc} – относительная деформация сжатия бетона (отрицательная величина);

σ_{bc} – напряжение сжатия в бетоне (отрицательная величина), МПа;

E_b – начальный модуль упругости бетона, МПа;

ν_{bc} – коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\nu_{bc} = \nu_{bc,top} + (\nu_{bc,start} - \nu_{bc,top}) \sqrt{1 - \omega_{bc} \eta_{bc} - (1 - \omega_{bc}) \eta_{bc}^2}, \quad (7.2)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\nu_{bc} = \nu_{bc,top} - (\nu_{bc,start} - \nu_{bc,top}) \sqrt{1 - \omega_{bc} \eta_{bc} - (1 - \omega_{bc}) \eta_{bc}^2}, \quad (7.3)$$

где $\nu_{bc,top}$ – коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии в вершине диаграммы (положительная величина);

- $v_{bc,start}$ – начальный коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии;
 ω_{bc} – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при сжатии;
 η_{bc} – уровень напряжений в бетоне при сжатии (положительная величина).

Коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии в вершине диаграммы (положительная величина):

$$v_{bc,top} = \left| \frac{R_{bc,n}}{E_b \varepsilon_{bc,top}} \right|, \quad (7.4)$$

где $R_{bc,n}$ – нормативная призмная прочность бетона с обеспеченностью 0,95 при сжатии, МПа;

$\varepsilon_{bc,top}$ – относительная деформация бетона при сжатии в вершине диаграммы (отрицательная величина):

$$\varepsilon_{bc,top} = -\frac{B}{E_b} \cdot \frac{1 + \left(0,80 - 0,15 \frac{B^2}{10000}\right) \frac{B}{60} + \frac{0,20}{B}}{0,12 + 1,03 \frac{B}{60}}, \quad (7.5)$$

где B – класс бетона по прочности на сжатие с обеспеченностью 0,95 (кубиковая прочность), МПа.

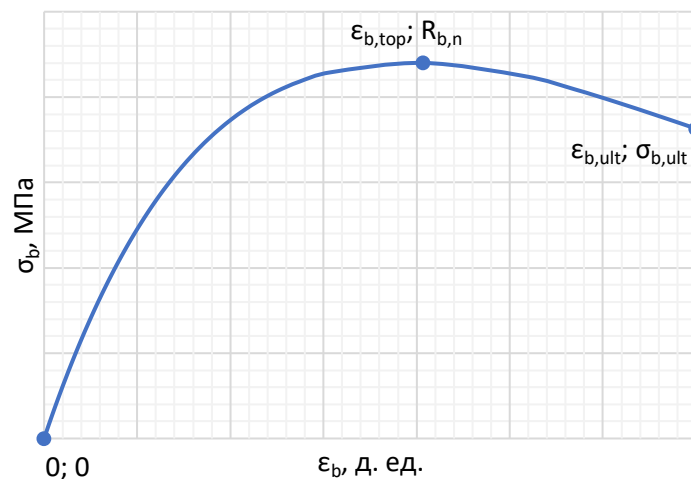


Рисунок 7.1 – Криволинейная диаграмма деформирования тяжелого бетона

Начальный коэффициент изменения секущего модуля бетона при сжатии:

для восходящей ветви диаграммы:

$$v_{bc,start} = 1,0, \quad (7.6)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$v_{bc,start} = 2,05v_{bc,top}. \quad (7.7)$$

Коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при сжатии:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bc} = 2,00 - 2,50v_{bc,top}, \quad (7.8)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bc} = 1,95v_{bc,top} - 0,138. \quad (7.9)$$

Если высота сжатой зоны изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов составляет от $0,2h_0$ до $0,5h_0$, где h_0 – рабочая высота сечения, то коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при сжатии, вычисляется по формулам:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bc} = 2,00 - 1,40v_{bc,top}, \quad (7.10)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bc} = 2,00v_{bc,top} - 0,13. \quad (7.11)$$

Уровень напряжений в бетоне при сжатии (положительная величина):

$$\eta_{bc} = \left| \frac{\sigma_{bc}}{R_{bc,n}} \right|. \quad (7.12)$$

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при **растяжении** и кратковременном нагружении принимается в следующем виде (см. рисунок 7.1):

$$\varepsilon_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{E_b v_{bt}}, \quad (7.13)$$

где ε_{bt} – относительная деформация растяжения бетона (положительная величина);

σ_{bt} – напряжение растяжения в бетоне (положительная величина), МПа;

E_b – начальный модуль упругости бетона, МПа;

v_{bt} – коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении:

для восходящей ветви диаграммы:

$$v_{bt} = v_{bt,top} + (v_{bt,start} - v_{bt,top})\sqrt{1 - \omega_{bt}\eta_{bt} - (1 - \omega_{bt})\eta_{bt}^2}, \quad (7.14)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$v_{bt} = v_{bt,top} - (v_{bt,start} - v_{bt,top})\sqrt{1 - \omega_{bt}\eta_{bt} - (1 - \omega_{bt})\eta_{bt}^2}, \quad (7.15)$$

- где $v_{bt,top}$ – коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении в вершине диаграммы;
- $v_{bt,start}$ – начальный коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении;
- ω_{bt} – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при растяжении;
- η_{bt} – уровень напряжений в бетоне при растяжении.

Коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении в вершине диаграммы:

$$v_{bt,top} = \frac{0,55 + 0,06R_{bt,n}}{\gamma_{btq}}, \quad (7.16)$$

- где $R_{bt,n}$ – нормативная прочность бетона с обеспеченностью 0,95 на осевое растяжение, МПа;
- γ_{btq} – коэффициент, учитывающий влияние градиентов деформаций.

Если высота сжатой зоны составляет от $0,2h_0$ до $0,5h_0$, где h_0 – рабочая высота сечения:

$$\gamma_{btq} = 2,007 - \sqrt[5]{\frac{h}{300}} \geq 0,907, \quad (7.17)$$

- где h – высота сечения, мм.

В остальных случаях $\gamma_{btq} = 1,0$.

Начальный коэффициент изменения секущего модуля бетона при растяжении:

для восходящей ветви диаграммы:

$$v_{bt,start} = 1,0, \quad (7.18)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$v_{bt,start} = 2,05v_{bt,top}. \quad (7.19)$$

Коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при растяжении:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bt} = 2,00 - 2,50v_{bt,top}, \quad (7.20)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bt} = 1,95v_{bt,top} - 0,138. \quad (7.21)$$

Если высота сжатой зоны изгибаемых, внецентренно сжатых и внецентренно растянутых элементов составляет от $0,2h_0$ до $0,5h_0$, где h_0 – рабочая высота сечения, то коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы бетона при растяжении, вычисляется по формулам:

для восходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bt} = 2,00 - 1,40\nu_{bt,top}, \quad (7.22)$$

для нисходящей ветви диаграммы:

$$\omega_{bt} = 2,00\nu_{bt,top} - 0,13. \quad (7.23)$$

Уровень напряжений в бетоне при растяжении:

$$\eta_{bt} = \frac{\sigma_{bt}}{R_{bt,n}\gamma_{btq}}. \quad (7.24)$$

Относительная деформация бетона при растяжении в вершине диаграммы:

$$\varepsilon_{bt,top} = \frac{R_{bt,n}\gamma_{btq}}{E_b\nu_{bt,top}}. \quad (7.25)$$

Длительное нагружение

Для учета влияния на процесс деформирования элементов длительного действия нагрузок используются два типа диаграмм-изохрон:

- диаграммы-изохроны, соответствующие ступенчатому режиму нагружения (жесткий режим), когда нагрузка мгновенно прикладывается в возрасте бетона t_0 , сут., с последующей выдержкой;
- диаграммы-изохроны, соответствующие режиму нагружения бетона в возрасте t_0 , сут., возрастающими напряжениями или деформациями (мягкий режим), причем скорость роста напряжений или деформаций в течение времени нагружения остается в среднем близкой к постоянной (например, при учете этапности возведения здания).

Возраст бетона в момент приложения нагрузки t_0 принимается не менее 7 суток.

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при длительном нагружении принимается по формулам (7.1) – (7.25) со следующими изменениями (индексы для сжатого или растянутого бетона условно не приводятся):

вместо $\nu_{b,top}$ используется значение $\nu_{b,top,cr}$:

$$\nu_{b,top,cr} = \frac{\nu_{b,top}}{1 + \nu_{b,top}f_c\varphi}; \quad (7.26)$$

на восходящей ветви диаграммы вместо $\nu_{b,start}$ используется значение $\nu_{b,start,cr}$:

$$\nu_{b,start,cr} = \frac{1}{1 + \varphi}. \quad (7.27)$$

Предельная характеристика ползучести бетона:

$$\varphi = \varphi_N \xi_1 \xi_2 (0,5 + d e^{-2\gamma t_0}). \quad (7.28)$$

При мягком режиме нагружения в формулах (7.26) и (7.27) вместо φ принимается $\varphi/2$.

Функция, учитывающая нелинейность деформаций ползучести:

$$f_c = 1 + k v_c, \quad (7.29)$$

где $k = 0,7$ – при жестком режиме нагружения;

$k = 0,3$ – при мягком режиме нагружения.

Параметры φ_N , ξ_1 , ξ_2 , d , γ и v_c в формулах (7.28) и (7.29) принимаются по таблицам 7.1-7.5. Промежуточные значения определяются по линейной интерполяции.

При жестком режиме нагружения ниспадающие ветви диаграммы не учитываются.

Таблица 7.1 – Параметры φ_N и v_c

Параметр	Класс бетона по прочности на сжатие					
	B15	B20	B30	B40	B50	B60 и выше
φ_N	3,29	3,10	2,73	2,41	1,95	1,56
v_c	1,87	1,41	0,97	0,74	0,74	0,74

Таблица 7.2 – Параметр ξ_1

Параметр	Относительная влажность воздуха окружающей среды, %						
	40 и менее	50	60	70	80	90	100
ξ_1	1,27	1,13	1,00	0,87	0,73	0,60	0,47

Таблица 7.3 – Параметр ξ_2

Параметр	Модуль открытой поверхности элемента, 1/м						
	0	5	10	20	30	40	60 и более
ξ_2	0,51	0,65	0,76	0,93	1,00	1,22	1,27

Таблица 7.4 – Параметр d

Параметр	t_0 , сут.	Модуль открытой поверхности элемента, 1/м			
		10 и менее	20	30	40 и более
d	7	0,752	0,842	0,942	1,052
	28 и более	0,625	0,700	0,785	0,875

Таблица 7.5 – Параметр γ

Параметр	Модуль открытой поверхности элемента, 1/м			
	10 и менее	20	30	40 и более
γ	0,004	0,006	0,008	0,010

7.3 Трехлинейные диаграммы деформирования тяжелого бетона

Кратковременное нагружение

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при сжатии и растяжении и кратковременном нагружении описывается следующими формулами (см. рисунок 7.2):

При $0 \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b1}$

$$\sigma_b = E_b \varepsilon_b, \quad (7.30)$$

При $\varepsilon_{b1} < \varepsilon_b < \varepsilon_{b0}$

$$\sigma_b = \left(0,4 \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_{b1}}{\varepsilon_{b0} - \varepsilon_{b1}} + 0,6 \right) R_b, \quad (7.31)$$

При $\varepsilon_{b0} \leq \varepsilon_b \leq \varepsilon_{b2}$

$$\sigma_b = R_b, \quad (7.32)$$

где $\varepsilon_{b1} = \sigma_{b1}/E_b = (0,6R_b)/E_b$ – относительные деформации условного предела пропорциональности.

Базовые относительные деформации принимаются равными:

$$\varepsilon_{bc0} = 0,0020; \quad \varepsilon_{bt0} = 0,00010;$$

$$\varepsilon_{bc2} = 0,0035; \quad \varepsilon_{bt2} = 0,00015.$$

Для высокопрочных бетонов классов по прочности на сжатие от В70 до В100 ε_{bc2} принимается по линейному закону от 0,0033 при В70 до 0,0028 при В100.

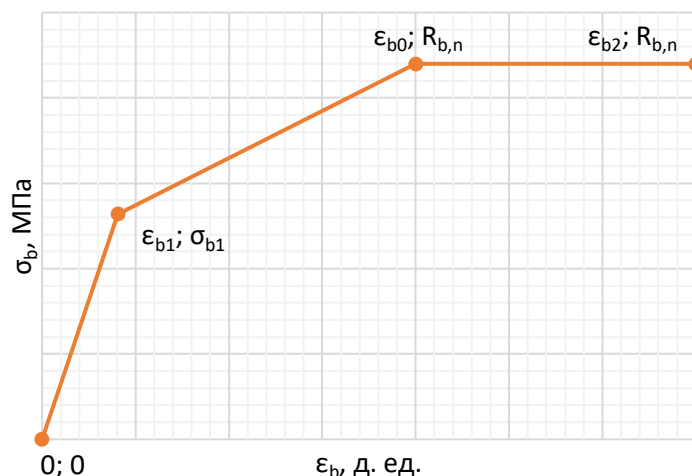


Рисунок 7.2 – Трехлинейная диаграмма деформирования тяжелого бетона

Длительное нагружение

Аналитическая зависимость деформирования тяжелого бетона при сжатии и растяжении и длительном нагружении также описывается формулами (7.30) – (7.32), в которых E_b умножается на $1/(1 + \varphi_{b,cr})$, а базовые относительные деформации принимаются по таблице 7.6.

Характеристика ползучести $\varphi_{b,cr}$ принимается по таблице 7.7.

Таблица 7.6 – Относительные деформации при длительном нагружении

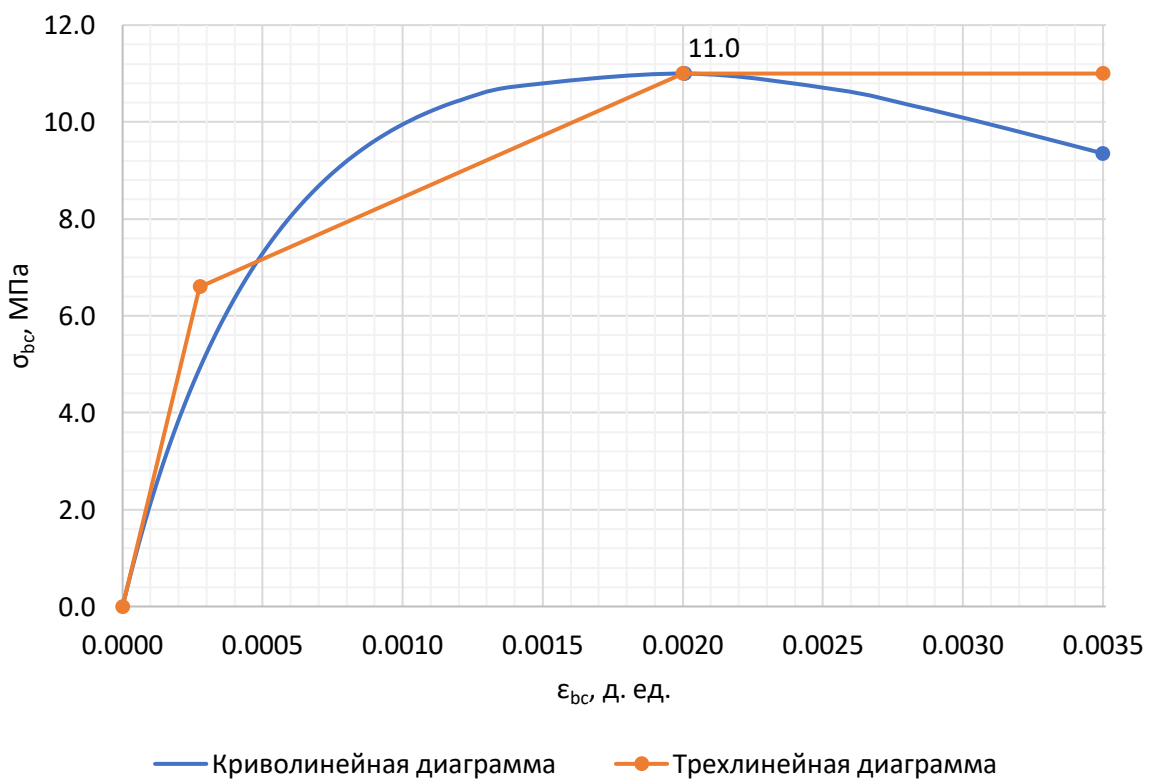
Параметр	Относительная влажность воздуха окружающей среды, %		
	выше 75	40-75	ниже 40
ε_{bc0}	0,00300	0,00340	0,00400
ε_{bc2}	0,00420	0,00480	0,00560
ε_{bt0}	0,00021	0,00024	0,00028
ε_{bt2}	0,00027	0,00031	0,00036

Таблица 7.7 – Характеристика ползучести $\varphi_{b,cr}$

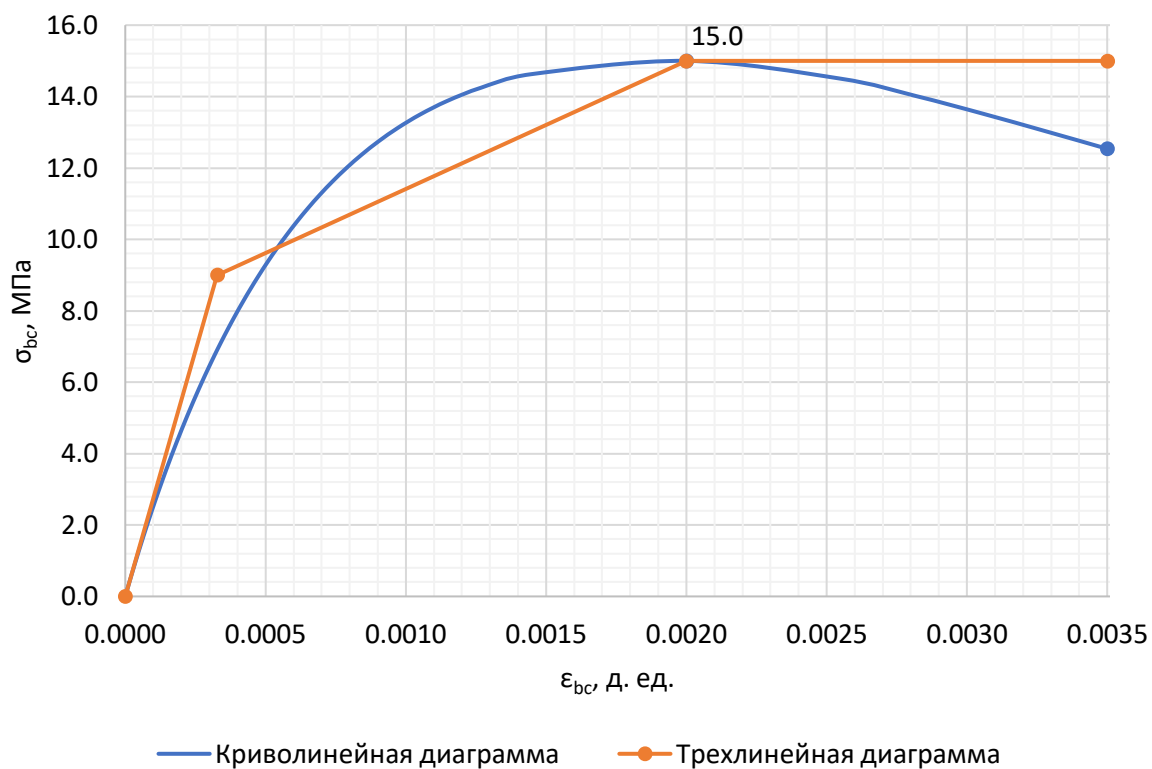
Относительная влажность воздуха окружающей среды, %	Класс бетона по прочности на сжатие									
	B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60-B100
выше 75	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
40-75	3,4	2,8	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4
ниже 40	4,8	4,0	3,6	3,2	3,0	2,8	2,6	2,4	2,2	2,0

7.4 Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона при сжатии

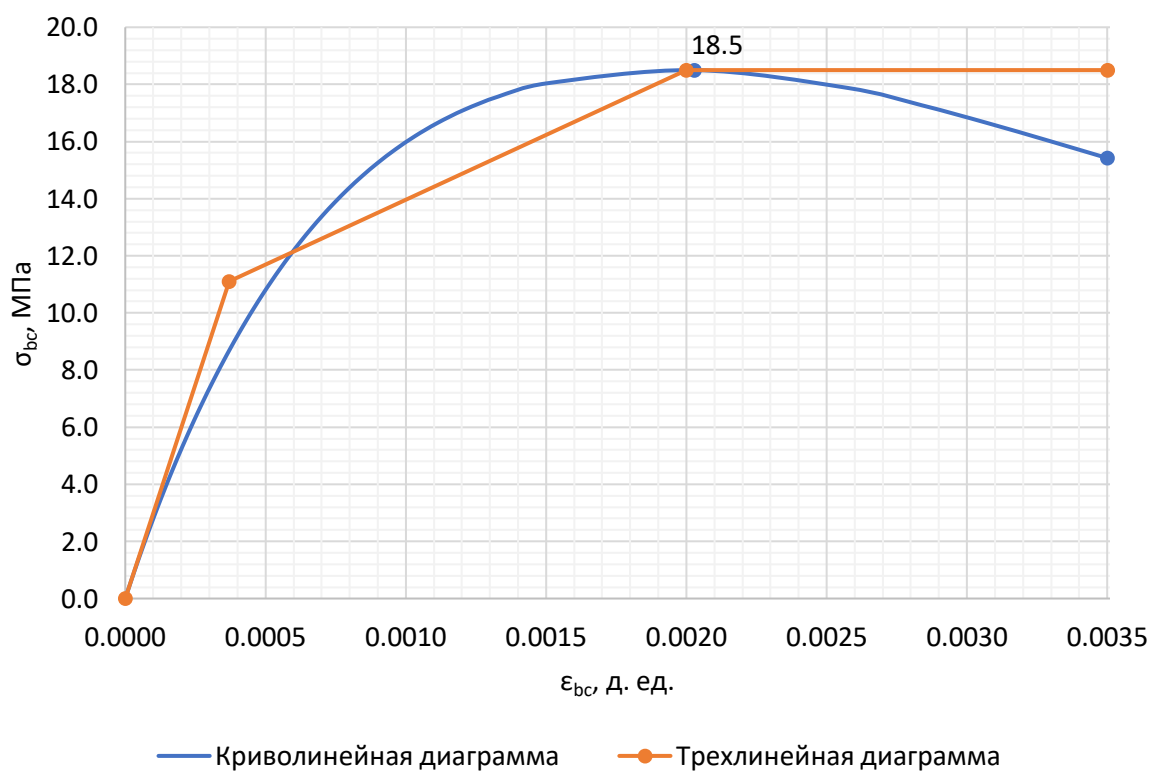
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса B15 при сжатии и кратковременном нагружении



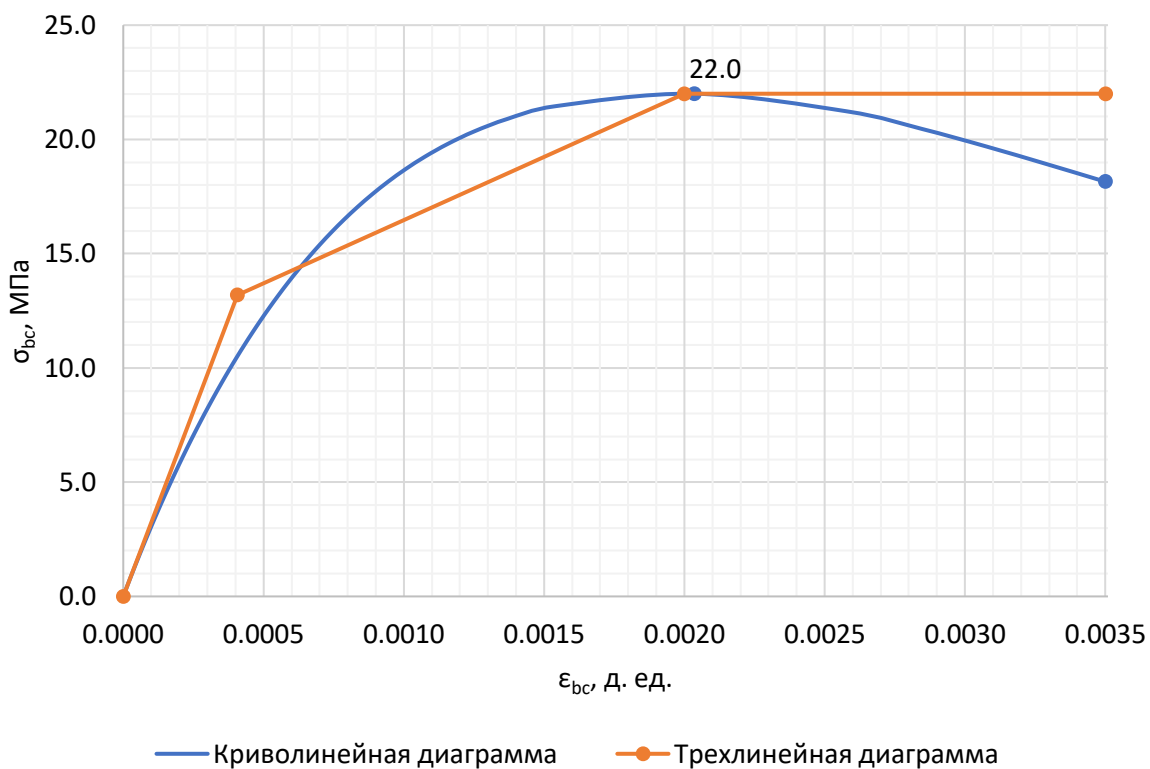
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В20 при сжатии и кратковременном нагружении



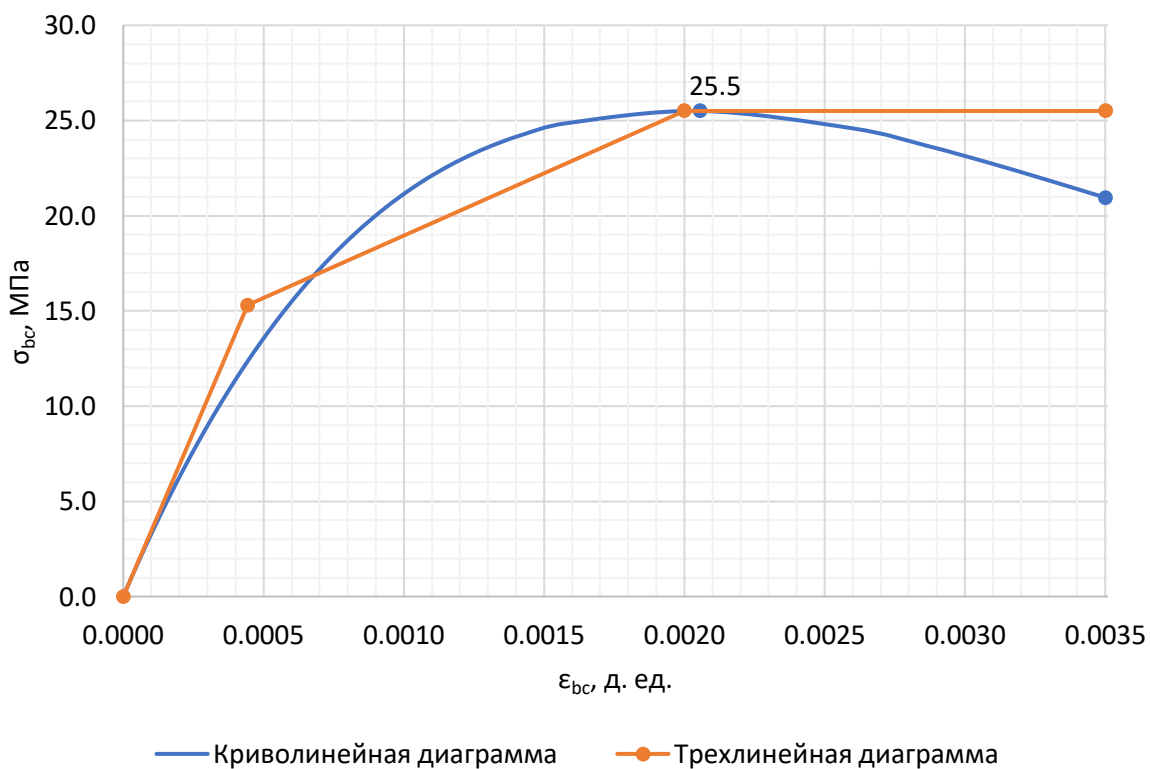
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В25 при сжатии и кратковременном нагружении



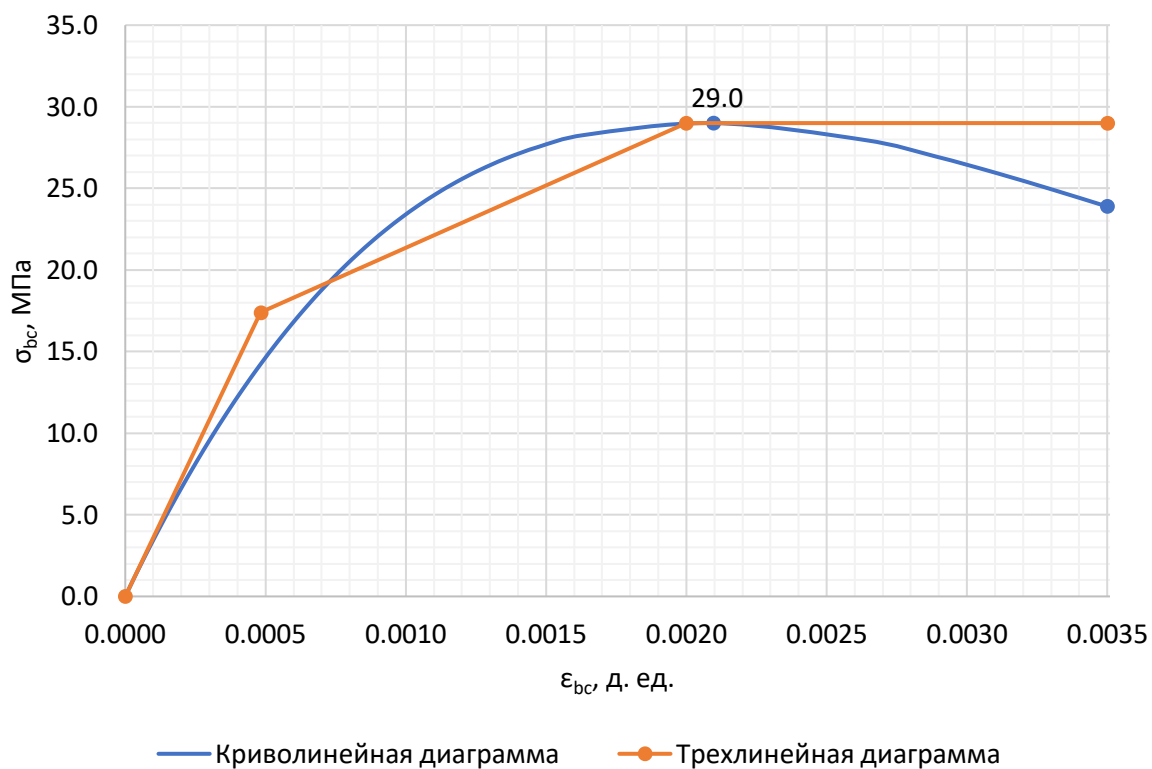
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В30 при сжатии и кратковременном нагружении



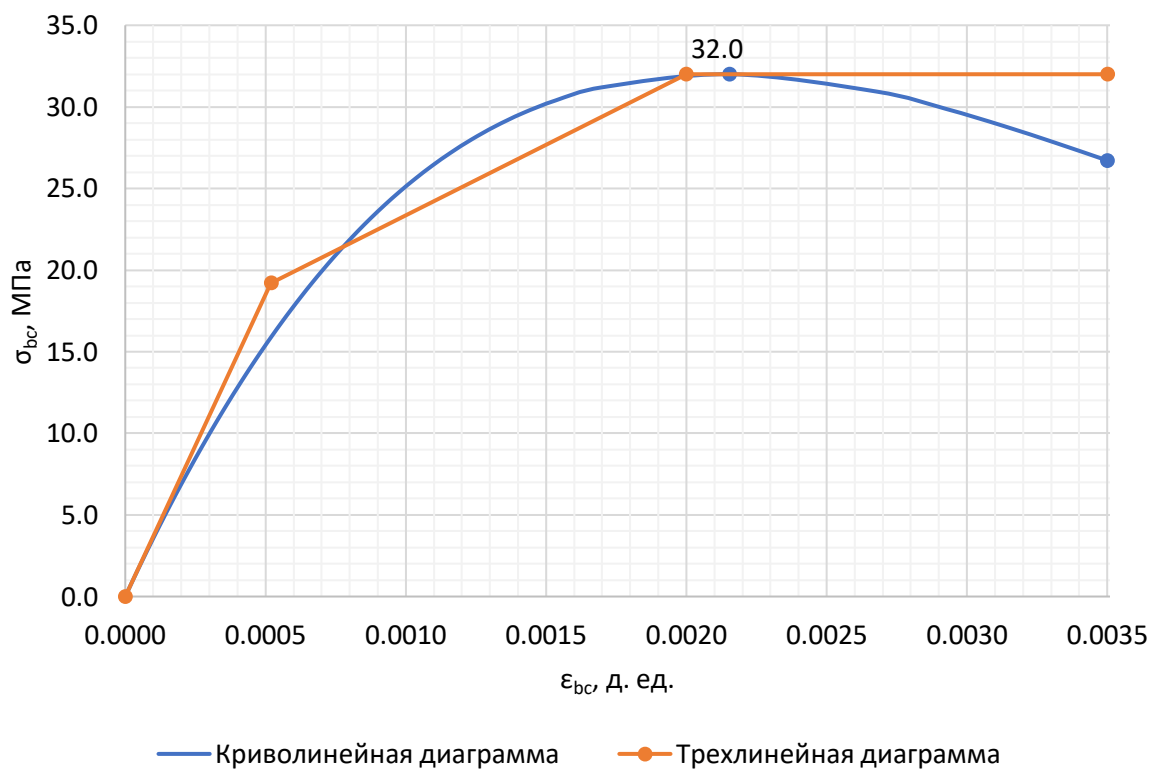
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В35 при сжатии и кратковременном нагружении



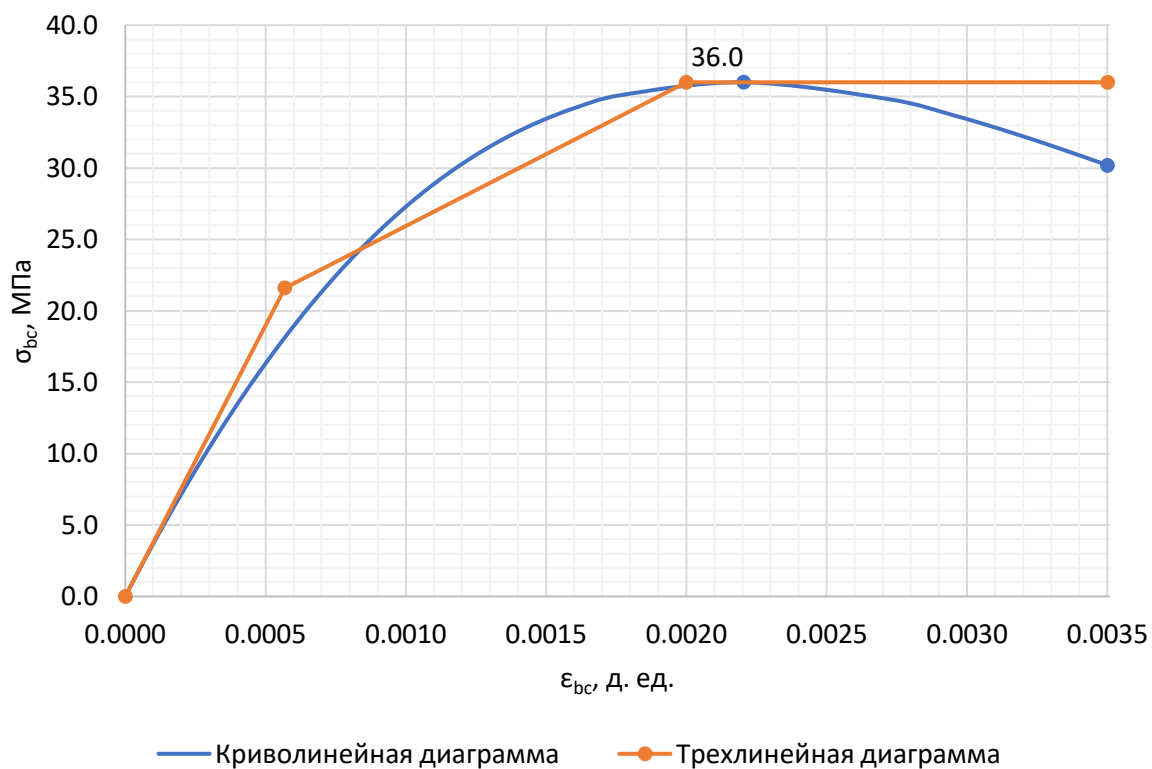
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В40 при сжатии и кратковременном нагружении



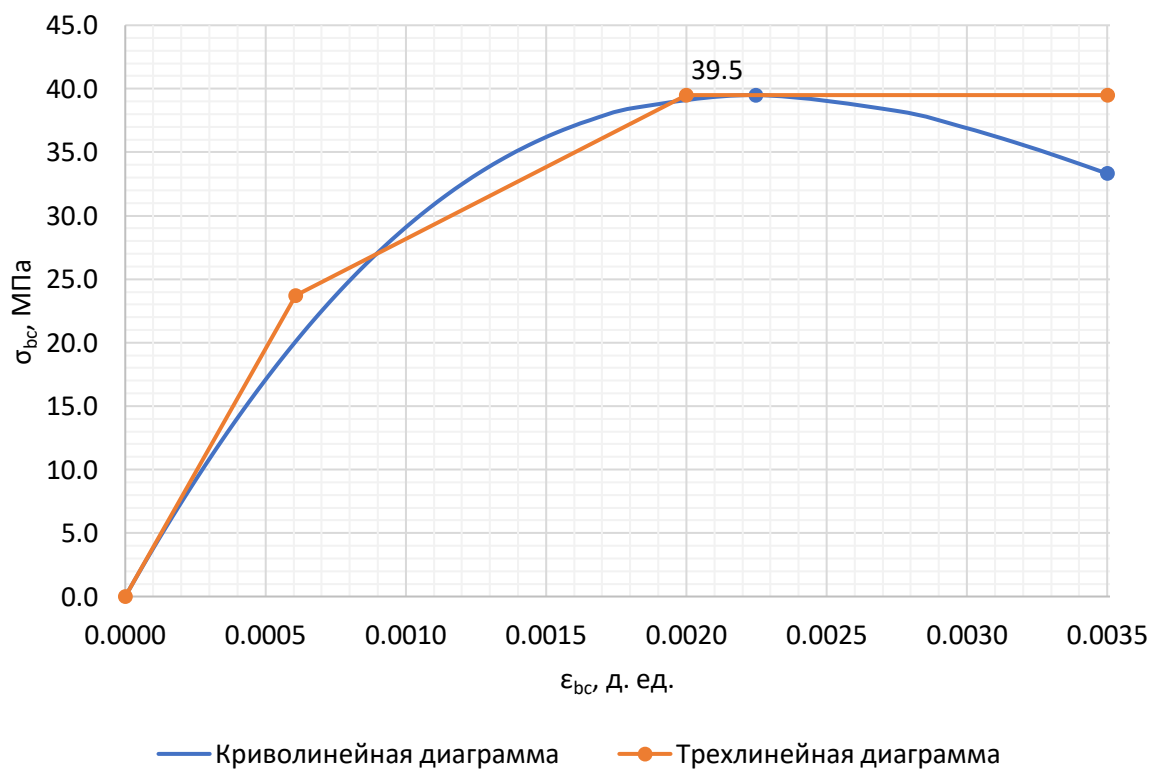
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В45 при сжатии и кратковременном нагружении



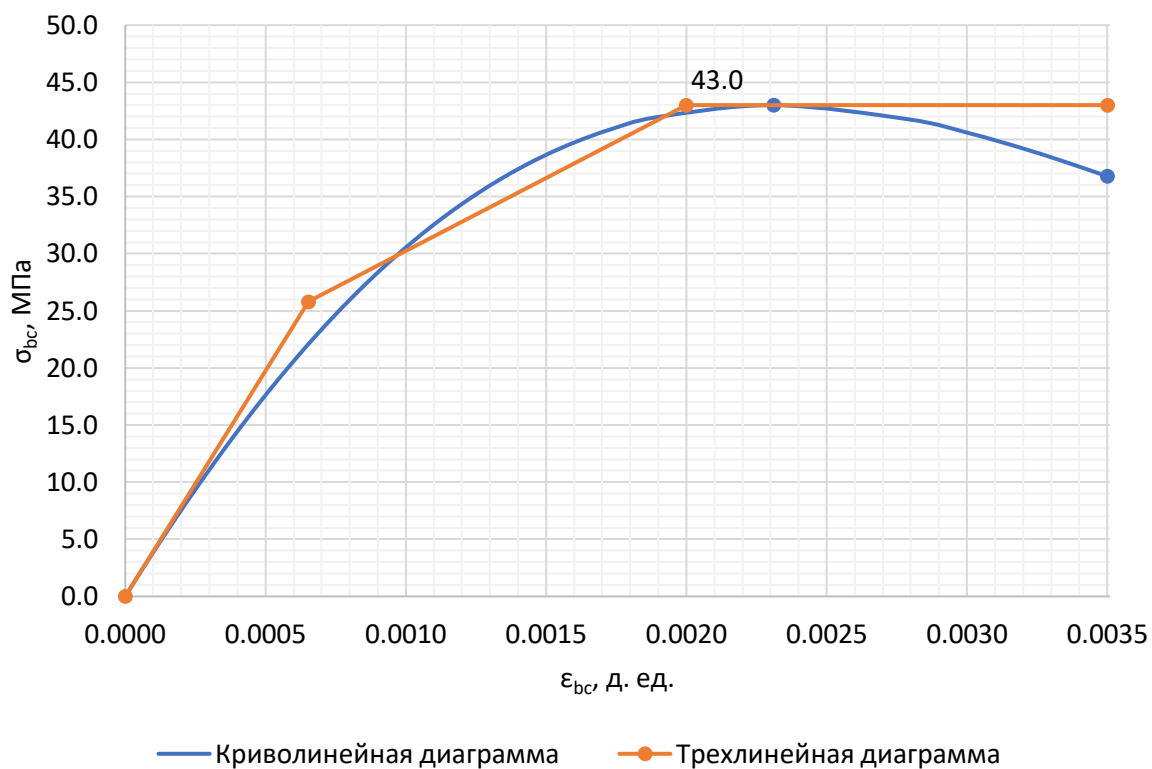
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса B50 при сжатии и кратковременном нагружении



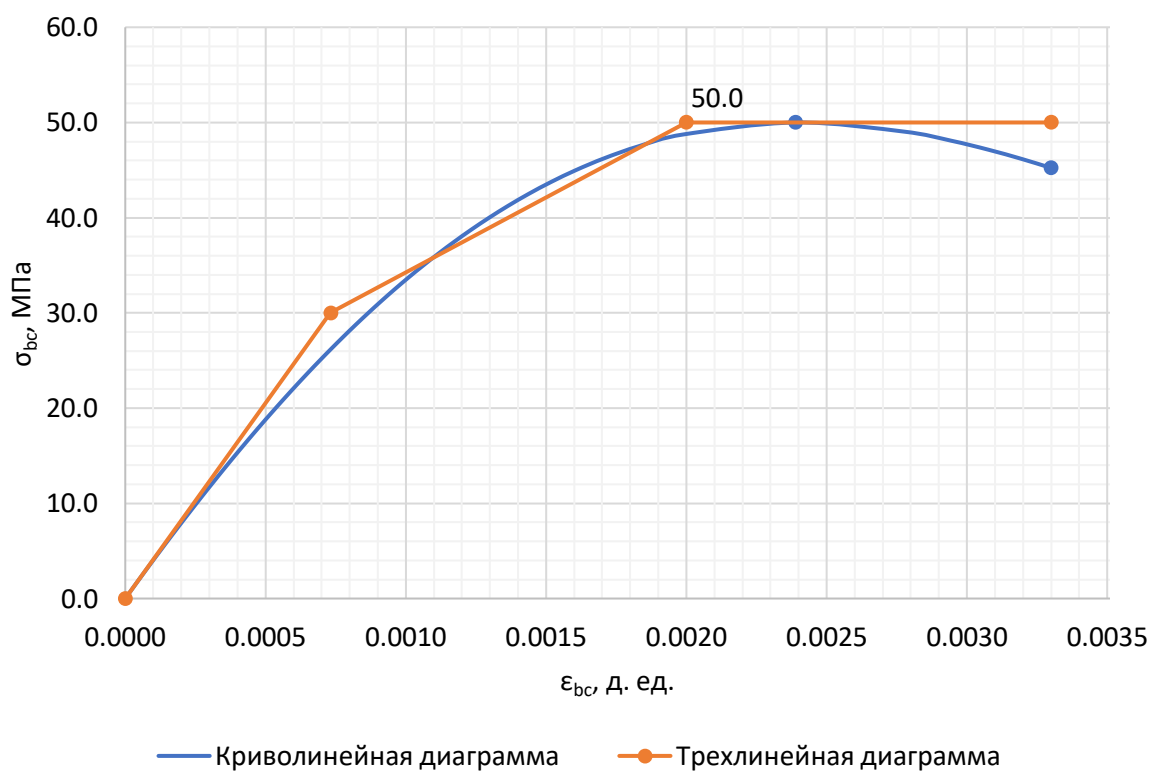
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса B55 при сжатии и кратковременном нагружении



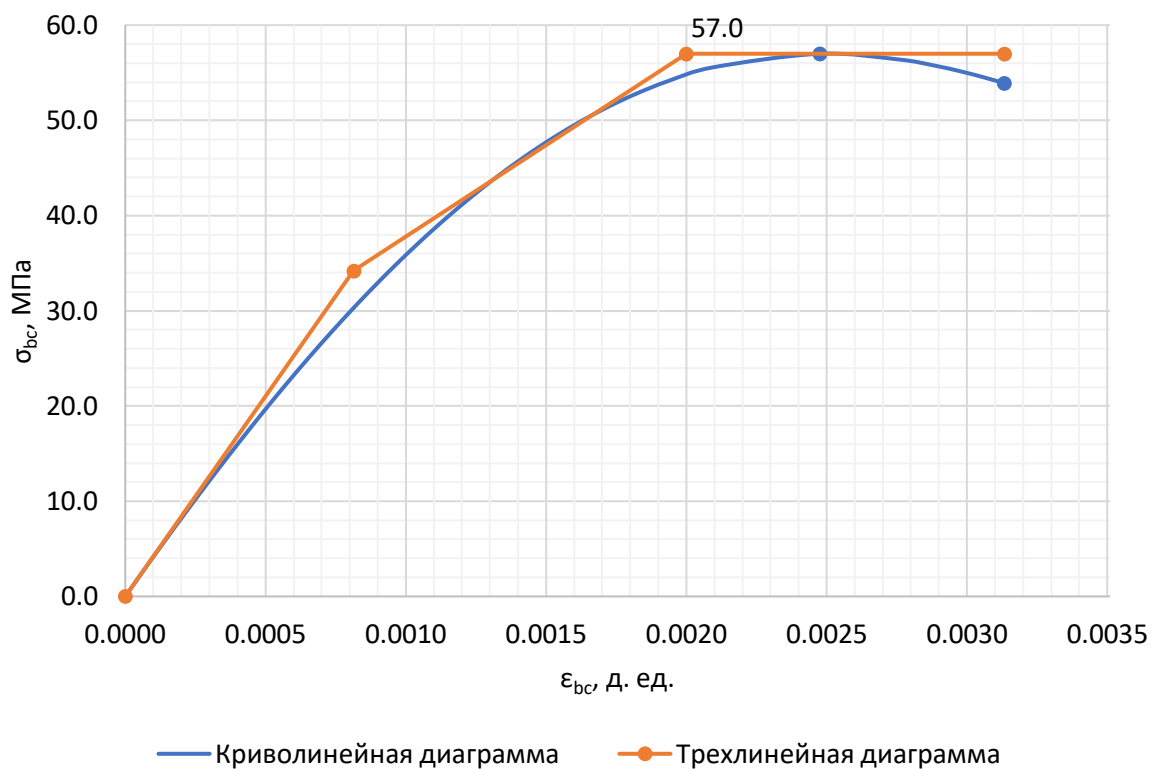
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В60 при сжатии и кратковременном нагружении



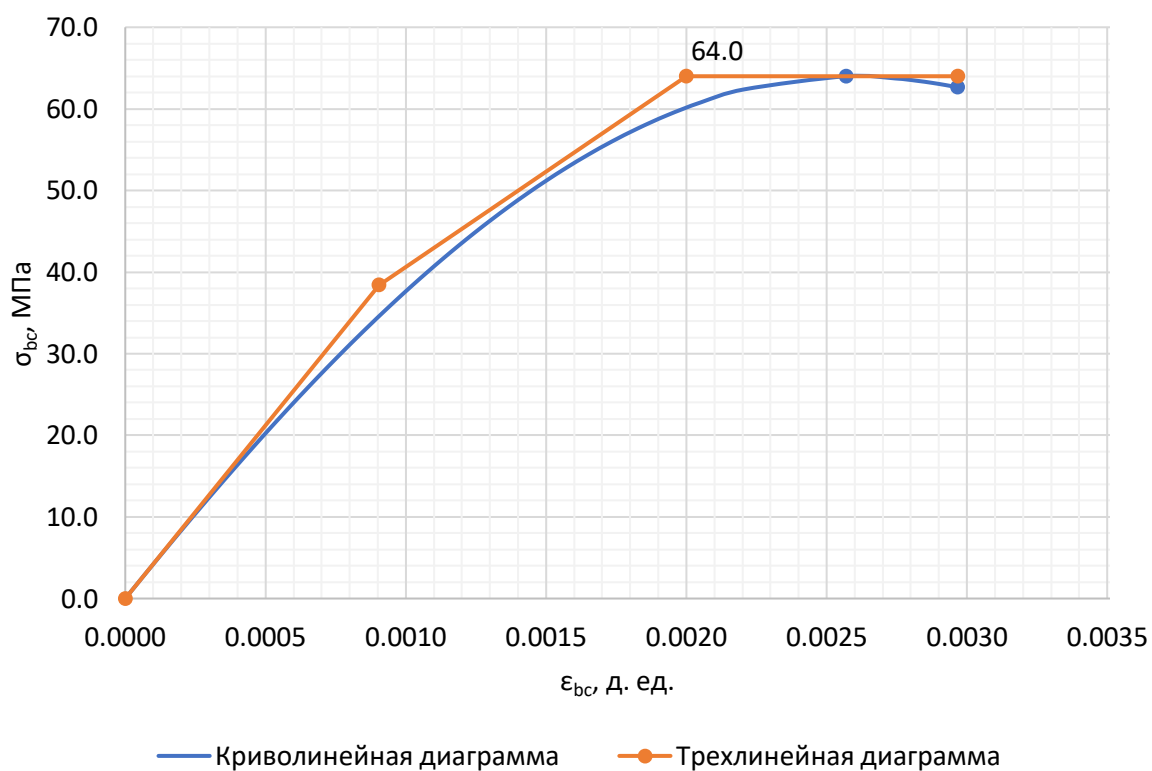
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В70 при сжатии и кратковременном нагружении



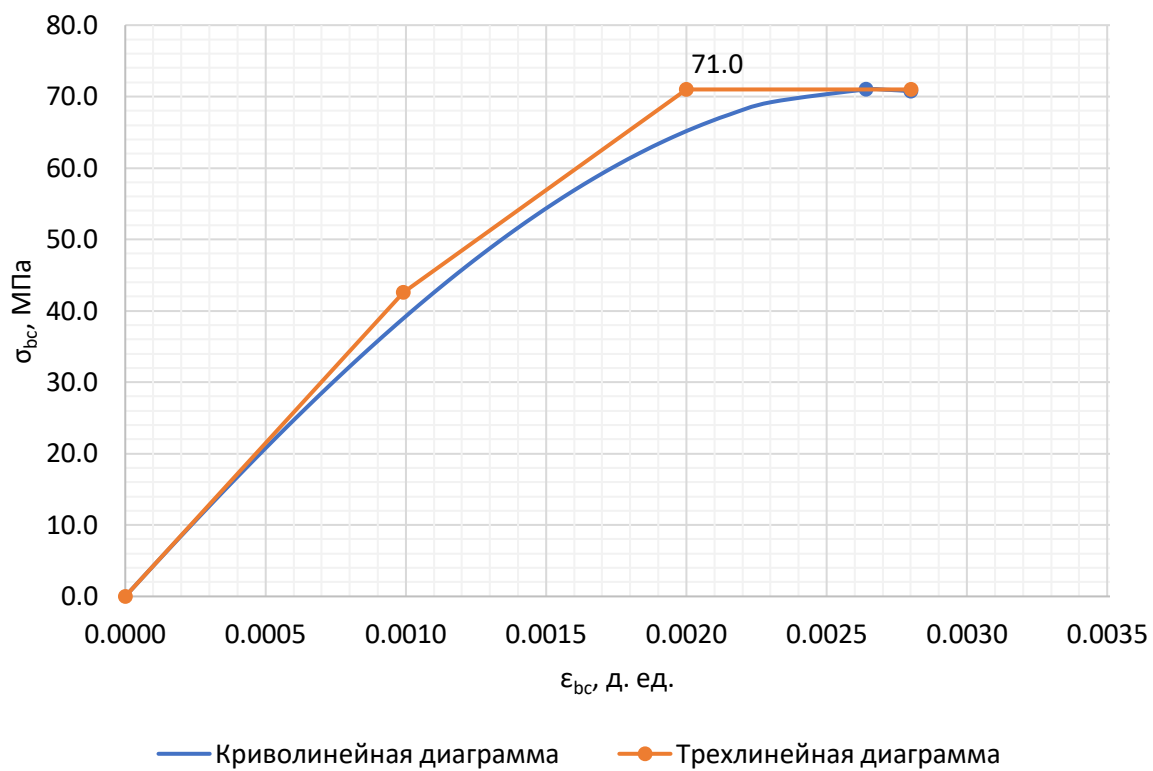
Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В80 при сжатии и кратковременном нагружении



Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В90 при сжатии и кратковременном нагружении



Нормативные диаграммы деформирования тяжелого бетона класса В100
при сжатии и кратковременном нагружении



8 Диаграммы деформирования арматуры

8.1 Общие положения

Диаграммы деформирования арматуры в приложении NDM представлены двух видов:

- кусочно-линейные (двухлинейные или трехлинейные) в соответствии с СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» (с изменениями № 1 и 2) [1];
- криволинейные в соответствии с методическим пособием «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии», разработанным ФАУ «ФЦС» [2].

Основные механические и деформационные характеристики арматуры принимаются по [1]. В данном руководстве приводятся только нормативные диаграммы деформирования арматуры. Для перехода к расчетным диаграммам необходимо нормативные сопротивления арматуры заменить на расчетные.

8.2 Криволинейные диаграммы деформирования арматуры

Арматура с условным пределом текучести

В соответствии с [1] арматура с условным пределом текучести классов по прочности на растяжение A600-A1000, Bp500, Bp1200-Bp1600, K1400-K1900. Дополнительные характеристики для построения диаграмм приведены в таблице 8.1 [2].

Таблица 8.1 – Дополнительные характеристики арматуры с условным пределом текучести

Класс арматуры	Характеристики		
	$\gamma_{s,el}$	$\gamma_{s,u}$	$\epsilon_{s,u}$
A600	0,70	1,35	0,060
A800	0,70	1,28	0,070
A1000	0,70	1,23	0,060
Bp500	0,70	1,08	0,025
Bp1200	0,85	1,05	0,040
Bp1300	0,85	1,05	0,040
Bp1400	0,85	1,10	0,050
Bp1500	0,85	1,20	0,060
Bp1600	0,85	1,20	0,060
K1400-K1900	0,80	1,07	0,050

Примечания:

1. При использовании арматуры определенного класса необходимо уточнять допустимые диаметры по соответствующим стандартам.
2. Предельные расчетные относительные деформации арматуры с условным пределом текучести ограничиваются значением $\epsilon_{s,ult} = 0,015$.

Аналитическая зависимость деформирования арматуры при растяжении и сжатии для выделенного участка диаграммы принимается в следующем виде (см. рисунок 8.1):

$$\epsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s \nu_s}, \quad (8.1)$$

где ϵ_s – относительная деформация арматуры;

σ_s – напряжение в арматуре, МПа;

E_s – модуль упругости арматуры, МПа;

ν_s – коэффициент изменения секущего модуля арматуры:

$$\nu_s = \nu_{s,top} + (\nu_{s,start} - \nu_{s,top}) \sqrt{1 - \omega_s \eta_s - (1 - \omega_s) \eta_s^2}, \quad (8.2)$$

где $\nu_{s,top}$ – коэффициент изменения секущего модуля арматуры в вершине участка диаграммы (положительная величина):

$$\nu_{s,top} = \left| \frac{\sigma_{s,top}}{E_s \epsilon_{s,top}} \right|, \quad (8.3)$$

- где $\sigma_{s,top}$ – напряжение в арматуре в вершине участка диаграммы, МПа;
 $\varepsilon_{s,top}$ – относительная деформация арматуры в вершине участка диаграммы;
 $\nu_{s,start}$ – коэффициент изменения секущего модуля арматуры в начале участка диаграммы (положительная величина):

$$\nu_{s,start} = \left| \frac{\sigma_{s,start}}{E_s \varepsilon_{s,start}} \right|, \quad (8.4)$$

- где $\sigma_{s,start}$ – напряжение в арматуре в начале участка диаграммы, МПа;
 $\varepsilon_{s,start}$ – относительная деформация арматуры в начале участка диаграммы;
 ω_s – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы арматуры (учитывается промежуточная точка):

$$\omega_s = \frac{(\nu_{s,start} - \nu_{s,top})^2 (\eta_{s,inter}^2 - 1) + (\nu_{s,inter} - \nu_{s,top})^2}{\eta_{s,inter} (\eta_{s,inter} - 1) (\nu_{s,start} - \nu_{s,top})^2} \leq 2, \quad (8.5)$$

- где $\eta_{s,inter}$ – уровень напряжений в арматуре в промежуточной точке участка диаграммы:

$$\eta_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter} - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right|, \quad (8.6)$$

- $\sigma_{s,inter}$ – напряжение в арматуре в промежуточной точке участка диаграммы, МПа;
 $\nu_{s,inter}$ – коэффициент изменения секущего модуля арматуры в промежуточной точке участка диаграммы (положительная величина):

$$\nu_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter}}{E_s \varepsilon_{s,inter}} \right|, \quad (8.7)$$

- где $\varepsilon_{s,inter}$ – относительная деформация арматуры в промежуточной точке участка диаграммы;
 η_s – уровень напряжений в арматуре (положительная величина):

$$\eta_s = \left| \frac{\sigma_s - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right|. \quad (8.8)$$

Диаграмма для арматуры с условным пределом текучести делится на два участка (см. рисунок 8.1):

- линейный участок $O-E$;
- криволинейный участок $E-A-U$.

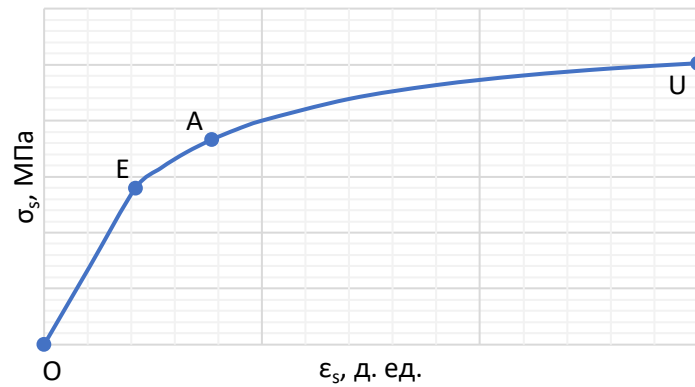


Рисунок 8.1 – Криволинейная диаграмма деформирования арматуры с условным пределом текучести

Линейный участок O-E

Линейный участок описывается формулой (8.1), в которой принимается $\nu_s = 1$.

Конец линейного участка – точка E:

$$\sigma_{s,E} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,el} \quad (8.9)$$

где $R_{s,n}$ – нормативное сопротивление арматуры растяжению при остаточном относительном удлинении 0,1 или 0,2 % с обеспеченностью 0,95, МПа;

$\gamma_{s,el}$ – см. таблицу 8.2;

$$\varepsilon_{s,E} = \frac{\sigma_{s,E}}{E_s} \quad (8.10)$$

В формуле (8.9) и далее положительное значение $R_{s,n}$ принимается при растяжении, отрицательное – при сжатии.

Криволинейный участок E-A-U

Начало криволинейного участка – точка E:

$$\sigma_{s,start} = \sigma_{s,E} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,el} \quad (8.11)$$

где $\gamma_{s,el}$ – см. таблицу 8.2;

$$\varepsilon_{s,start} = \varepsilon_{s,E} = \frac{\sigma_{s,E}}{E_s}; \quad (8.12)$$

$$\nu_{s,start} = \left| \frac{\sigma_{s,start}}{E_s \varepsilon_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,E}}{E_s \varepsilon_{s,E}} \right| = 1. \quad (8.13)$$

Вершина криволинейного участка – точка U:

$$\sigma_{s,top} = \sigma_{s,U} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,u} \quad (8.14)$$

где $\gamma_{s,u}$ – см. таблицу 8.2;

$$\varepsilon_{s,top} = \varepsilon_{s,U} = \pm \varepsilon_{s,u}, \quad (8.15)$$

где $\varepsilon_{s,u}$ – см. таблицу 8.2;

$$v_{s,top} = \left| \frac{\sigma_{s,top}}{E_s \varepsilon_{s,top}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,U}}{E_s \varepsilon_{s,U}} \right|. \quad (8.16)$$

Промежуточная точка криволинейного участка – точка А:

$$\sigma_{s,inter} = \sigma_{s,A} = \pm R_{s,n}; \quad (8.17)$$

$$\varepsilon_{s,inter} = \varepsilon_{s,A} = \pm \left(\frac{R_{s,n}}{E_s} + 0,002 \right); \quad (8.18)$$

$$v_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter}}{E_s \varepsilon_{s,inter}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,A}}{E_s \varepsilon_{s,A}} \right| = \frac{R_{s,n}}{R_{s,n} + 0,002 E_s}; \quad (8.19)$$

$$\eta_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter} - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,A} - \sigma_{s,E}}{\sigma_{s,U} - \sigma_{s,E}} \right| = \frac{1 - \gamma_{s,el}}{\gamma_{s,u} - \gamma_{s,el}}. \quad (8.20)$$

Арматура с физической площадкой текучести

В соответствии с [1] арматура с физической площадкой текучести классов по прочности на растяжение А240, А400, А500, В500. Дополнительные характеристики для построения диаграмм приведены в таблице 8.2 [2].

Таблица 8.2 – Дополнительные характеристики арматуры с физической площадкой текучести

Класс арматуры	Характеристики				
	$\gamma_{s,el}$	$\gamma_{s,p}$	$\varepsilon_{s,p}$	$\gamma_{s,u}$	$\varepsilon_{s,u}$
A240	0,97	1,01	0,015	2,00	0,190
A400	0,90	1,05	0,012	1,45	0,140
A500	0,85	1,07	0,008	1,30	0,100
B500	0,80	1,04	0,005	1,10	0,030

Примечания:

1. При использовании арматуры определенного класса необходимо уточнять допустимые диаметры по соответствующим стандартам.
2. Предельные расчетные относительные деформации арматуры с физической площадкой текучести ограничиваются значением $\varepsilon_{s,ult} = 0,025$.

Аналитическая зависимость деформирования арматуры с физической площадкой текучести описывается формулами (8.1) – (8.8) и делится на три участка (см. рисунок 8.2):

- линейный участок $O-E$;
- криволинейный участок $E-A-P$;
- криволинейный участок $P-K-U$.

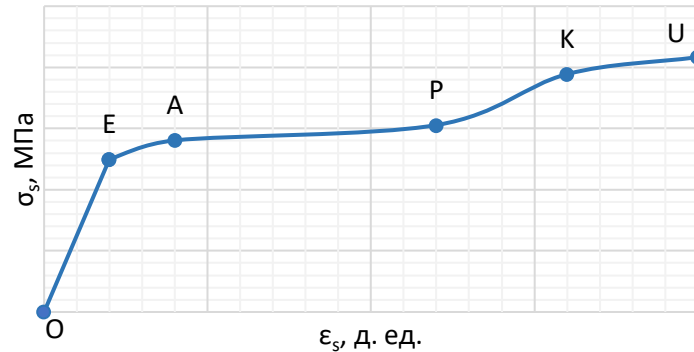


Рисунок 8.2 – Криволинейная диаграмма деформирования арматуры с физической площадкой текучести

Линейный участок $O-E$

Линейный участок описывается формулой (8.1), в которой принимается $\nu_s = 1$.

Конец линейного участка – точка E :

$$\sigma_{s,E} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,el}, \quad (8.21)$$

где $\gamma_{s,el}$ – см. таблицу 8.2;

$$\varepsilon_{s,E} = \frac{\sigma_{s,E}}{E_s}. \quad (8.22)$$

Криволинейный участок $E-A-P$

Начало криволинейного участка – точка E :

$$\sigma_{s,start} = \sigma_{s,E} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,el}, \quad (8.23)$$

где $\gamma_{s,el}$ – см. таблицу 8.2;

$$\varepsilon_{s,start} = \varepsilon_{s,E} = \frac{\sigma_{s,E}}{E_s}; \quad (8.24)$$

$$\nu_{s,start} = \left| \frac{\sigma_{s,start}}{E_s \varepsilon_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,E}}{E_s \varepsilon_{s,E}} \right| = 1. \quad (8.25)$$

Вершина криволинейного участка – точка P :

$$\sigma_{s,top} = \sigma_{s,P} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,p}, \quad (8.26)$$

где $\gamma_{s,p}$ – см. таблицу 8.2;

$$\varepsilon_{s,top} = \varepsilon_{s,P} = \pm \varepsilon_{s,p}, \quad (8.27)$$

где $\varepsilon_{s,p}$ – см. таблицу 8.2;

$$v_{s,top} = \left| \frac{\sigma_{s,top}}{E_s \varepsilon_{s,top}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,P}}{E_s \varepsilon_{s,P}} \right|. \quad (8.28)$$

Промежуточная точка криволинейного участка – точка А:

$$\sigma_{s,inter} = \sigma_{s,A} = \pm R_{s,n}; \quad (8.29)$$

$$\varepsilon_{s,inter} = \varepsilon_{s,A} = \pm \left(\frac{R_{s,n}}{E_s} + 0,002 \right); \quad (8.30)$$

$$v_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter}}{E_s \varepsilon_{s,inter}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,A}}{E_s \varepsilon_{s,A}} \right| = \frac{R_{s,n}}{R_{s,n} + 0,002 E_s}; \quad (8.31)$$

$$\eta_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter} - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,A} - \sigma_{s,E}}{\sigma_{s,P} - \sigma_{s,E}} \right| = \frac{1 - \gamma_{s,el}}{\gamma_{s,p} - \gamma_{s,el}}. \quad (8.32)$$

Криволинейный участок P-K-U

Начало криволинейного участка – точка P (см. формулы (8.26) и (8.27):

$$\sigma_{s,start} = \sigma_{s,P}; \quad (8.33)$$

$$\varepsilon_{s,start} = \varepsilon_{s,P}; \quad (8.34)$$

$$v_{s,start} = \left| \frac{\sigma_{s,start}}{E_s \varepsilon_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,P}}{E_s \varepsilon_{s,P}} \right|. \quad (8.35)$$

Вершина криволинейного участка – точка U:

$$\sigma_{s,top} = \sigma_{s,U} = \pm R_{s,n} \gamma_{s,u}, \quad (8.36)$$

где $\gamma_{s,u}$ – см. таблицу 8.2.

$$\varepsilon_{s,top} = \varepsilon_{s,U} = \pm \varepsilon_{s,u}, \quad (8.37)$$

где $\varepsilon_{s,u}$ – см. таблицу 8.2.

$$v_{s,top} = \left| \frac{\sigma_{s,top}}{E_s \varepsilon_{s,top}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,U}}{E_s \varepsilon_{s,U}} \right|. \quad (8.38)$$

Промежуточная точка криволинейного участка – точка K:

$$\sigma_{s,inter} = \sigma_{s,K} = \pm \left(\sigma_{s,P} + 0,2(\sigma_{s,U} - \sigma_{s,P}) \right) = \pm R_{s,n} (0,8\gamma_{s,p} + 0,2\gamma_{s,u}); \quad (8.39)$$

$$\varepsilon_{s,inter} = \varepsilon_{s,K} = 1,2\varepsilon_{s,p}; \quad (8.40)$$

$$v_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter}}{E_s \varepsilon_{s,inter}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,K}}{E_s \varepsilon_{s,K}} \right|; \quad (8.41)$$

$$\eta_{s,inter} = \left| \frac{\sigma_{s,inter} - \sigma_{s,start}}{\sigma_{s,top} - \sigma_{s,start}} \right| = \left| \frac{\sigma_{s,K} - \sigma_{s,P}}{\sigma_{s,U} - \sigma_{s,P}} \right| = 0,2. \quad (8.42)$$

8.3 Кусочно-линейные диаграммы деформирования арматуры

Арматура с условным пределом текучести

Аналитическая зависимость деформирования арматуры с условным пределом текучести принимается трехлинейной и описывается следующими формулами (см. рисунок 8.3):

При $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,A}$,

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad (8.43)$$

При $\varepsilon_{s,A} < \varepsilon_s < \varepsilon_{s,B}$

$$\sigma_s = \left(0,1 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{s,A}}{\varepsilon_{s,0.2} - \varepsilon_{s,A}} + 0,9 \right) R_{s,n}, \quad (8.44)$$

При $\varepsilon_{s,B} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,C}$

$$\sigma_s = 1,1 R_{s,n}, \quad (8.45)$$

В формулах (8.43) – (8.45):

$$\varepsilon_{s,A} = \frac{0,9 R_{s,n}}{E_s}; \quad (8.46)$$

$$\varepsilon_{s,B} = \frac{1,1 R_{s,n}}{E_s} + 0,004; \quad (8.47)$$

$$\varepsilon_{s,C} = 0,015; \quad (8.48)$$

$$\varepsilon_{s,0.2} = \frac{R_{s,n}}{E_s} + 0,002. \quad (8.49)$$

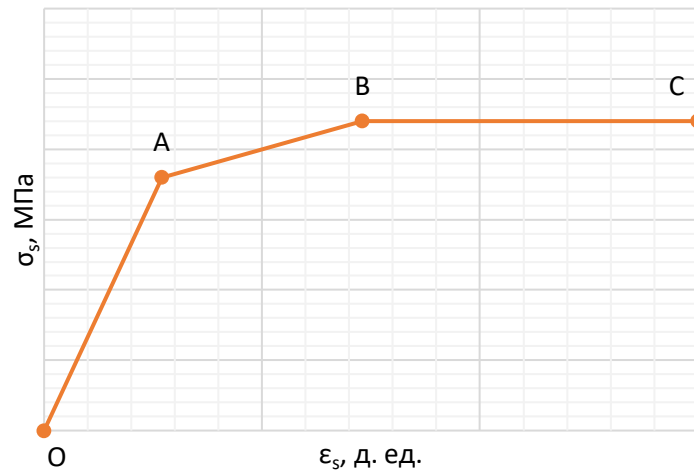


Рисунок 8.3 – Трехлинейная диаграмма деформирования арматуры с условным пределом текучести

Арматура с физической площадкой текучести

Аналитическая зависимость деформирования арматуры физической площадкой текучести принимается двухлинейной и описывается следующими формулами (см. рисунок 8.4):

При $0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,A}$,

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad (8.50)$$

При $\varepsilon_{s,A} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,C}$

$$\sigma_s = R_{s,n}, \quad (8.51)$$

В формулах (8.50) и (8.51):

$$\varepsilon_{s,A} = \frac{R_{s,n}}{E_s}; \quad (8.52)$$

$$\varepsilon_{s,C} = 0,025. \quad (8.53)$$

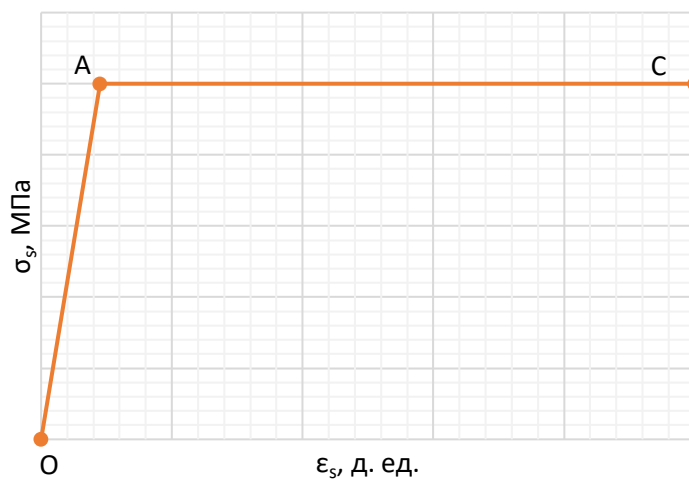
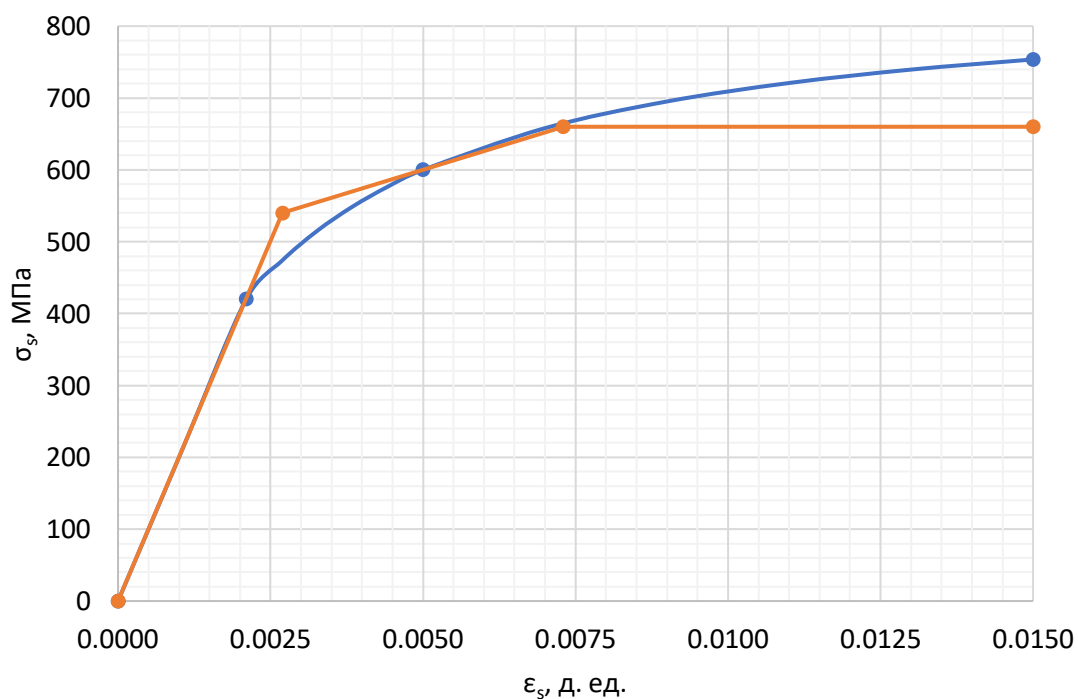


Рисунок 8.4 – Двухлинейная диаграмма деформирования арматуры с физической площадкой текучести

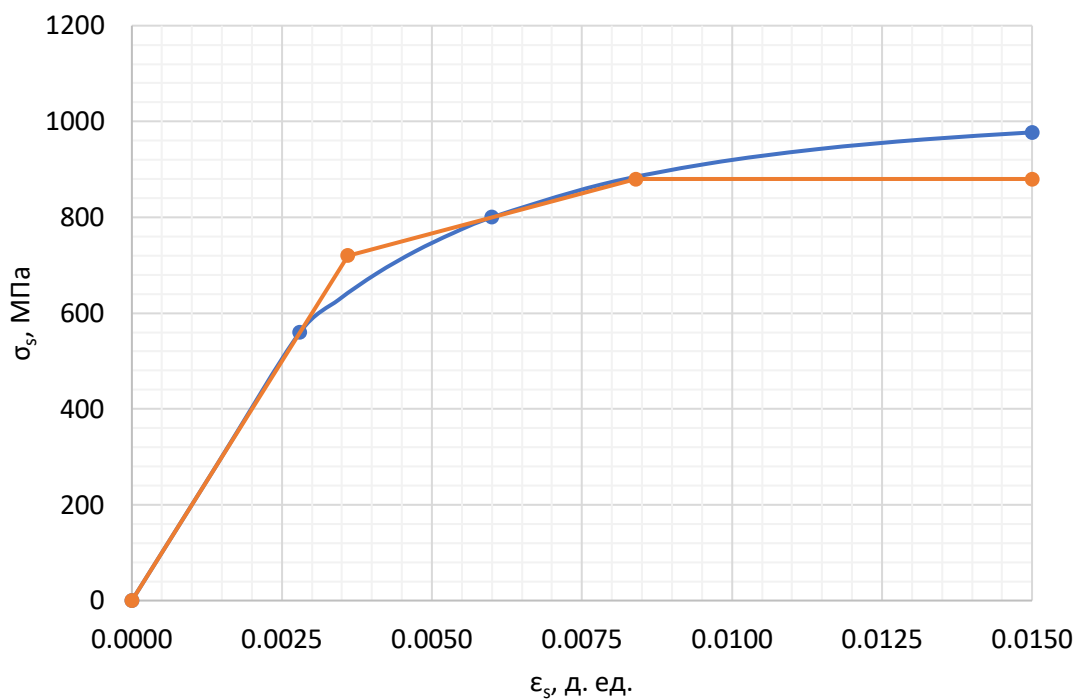
8.4 Нормативные диаграммы деформирования арматуры с условным пределом текучести

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса А600



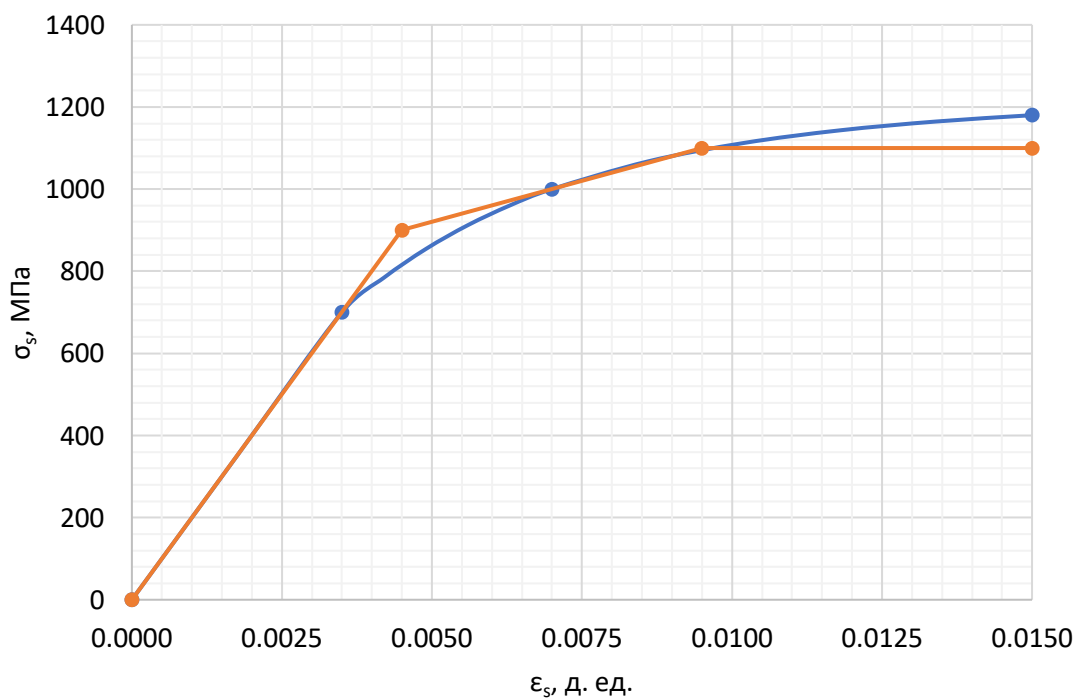
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса А800



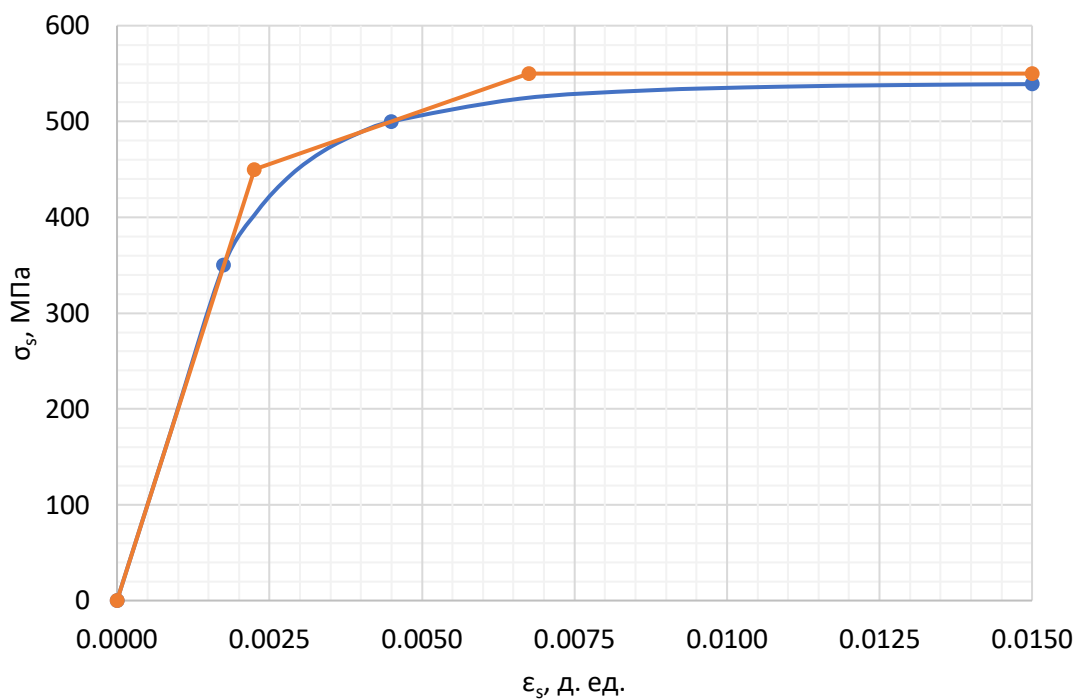
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса А1000



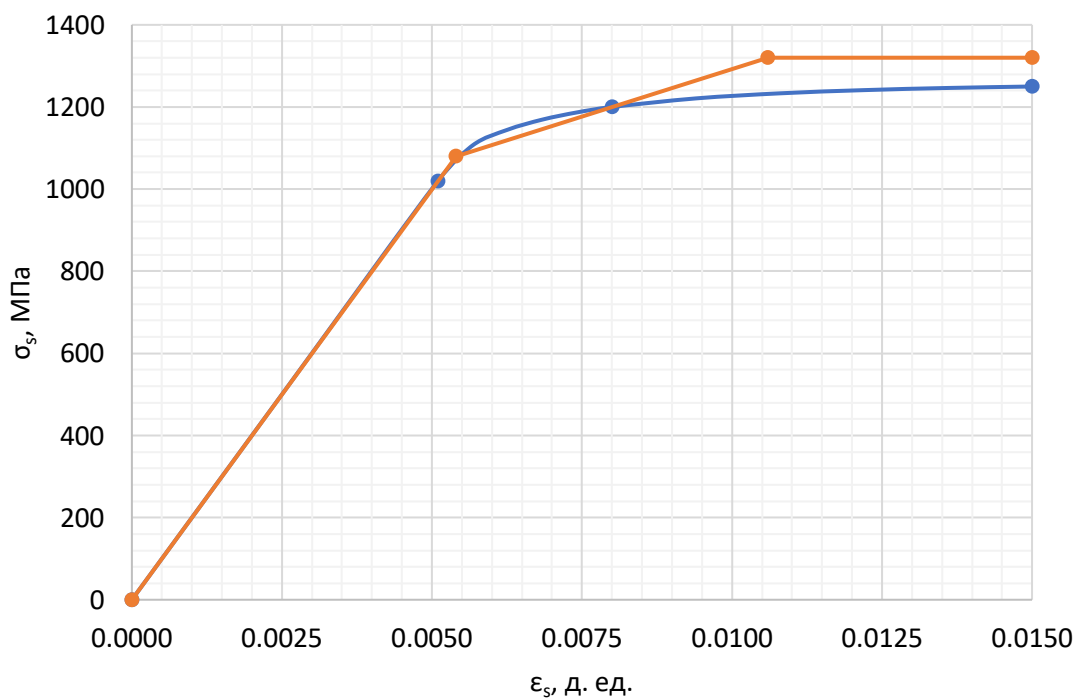
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр500



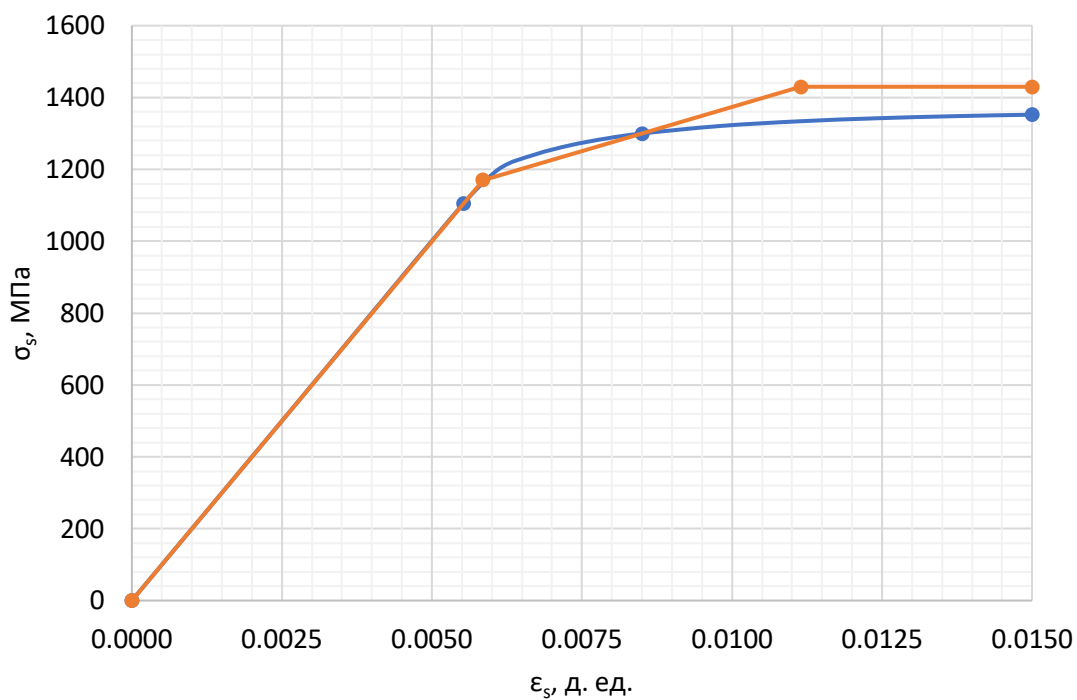
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1200



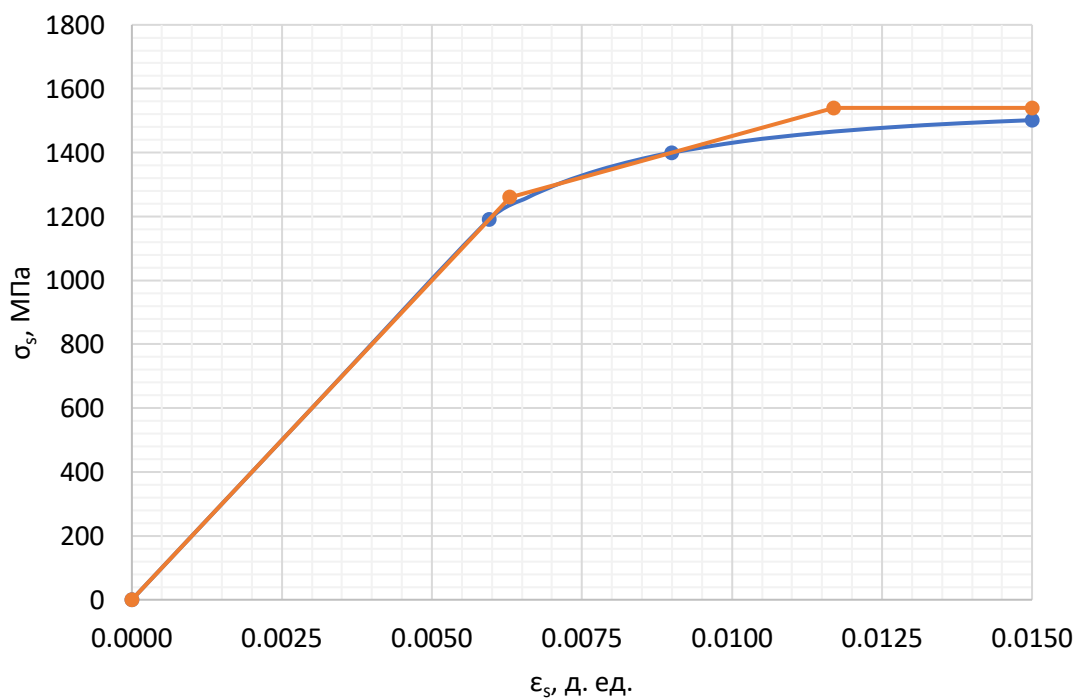
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1300



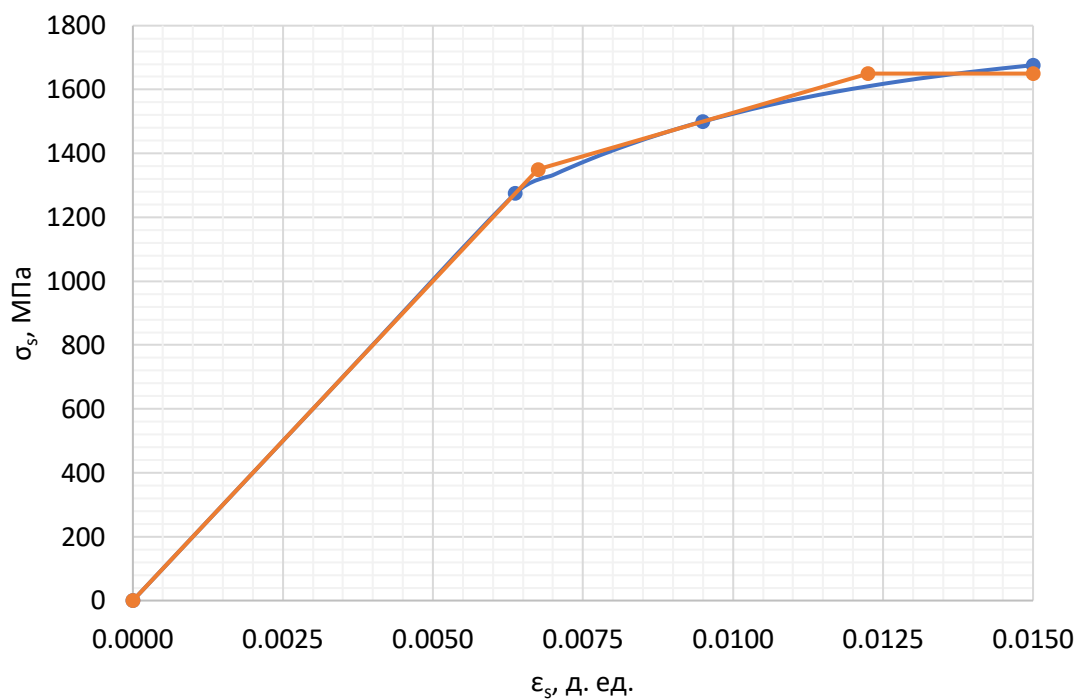
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1400



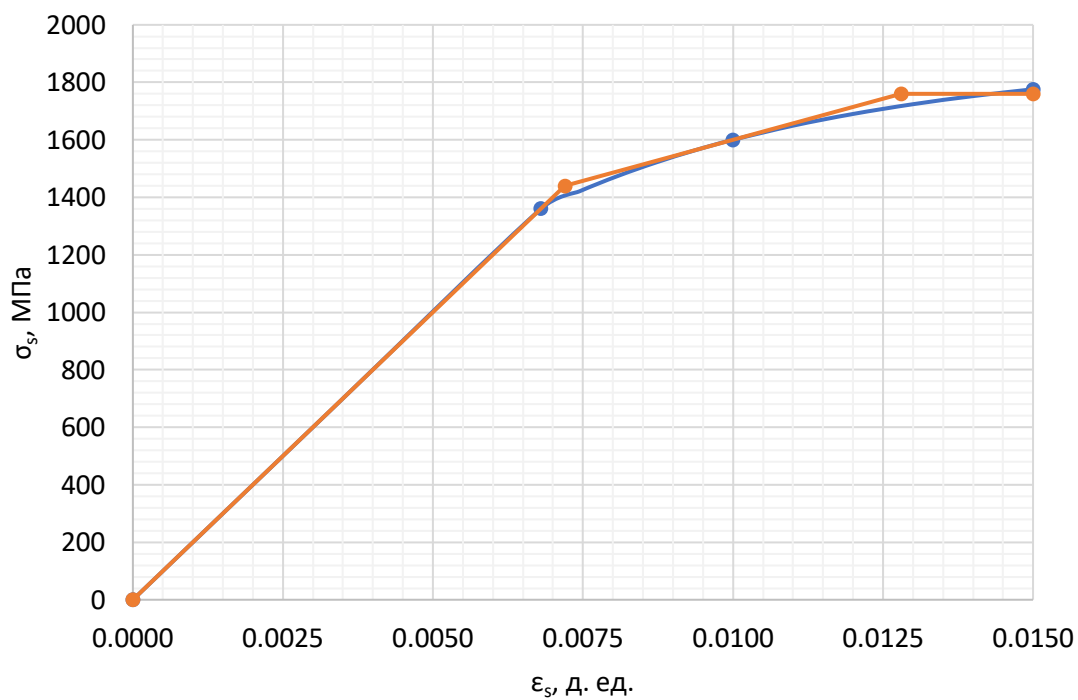
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1500



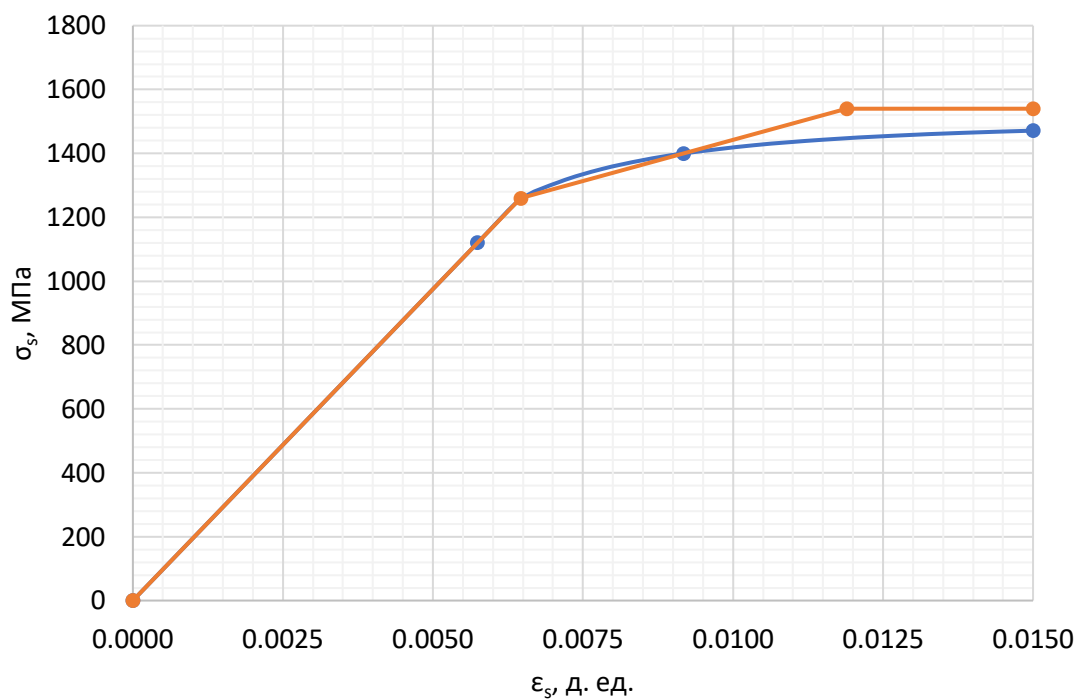
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса Вр1600



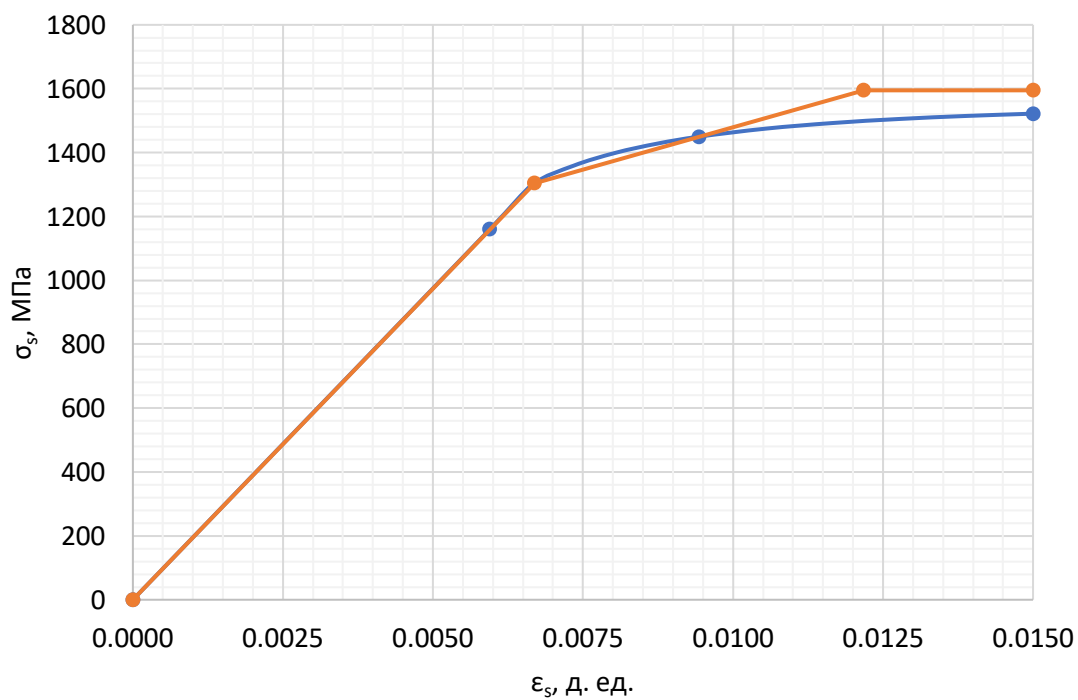
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1400



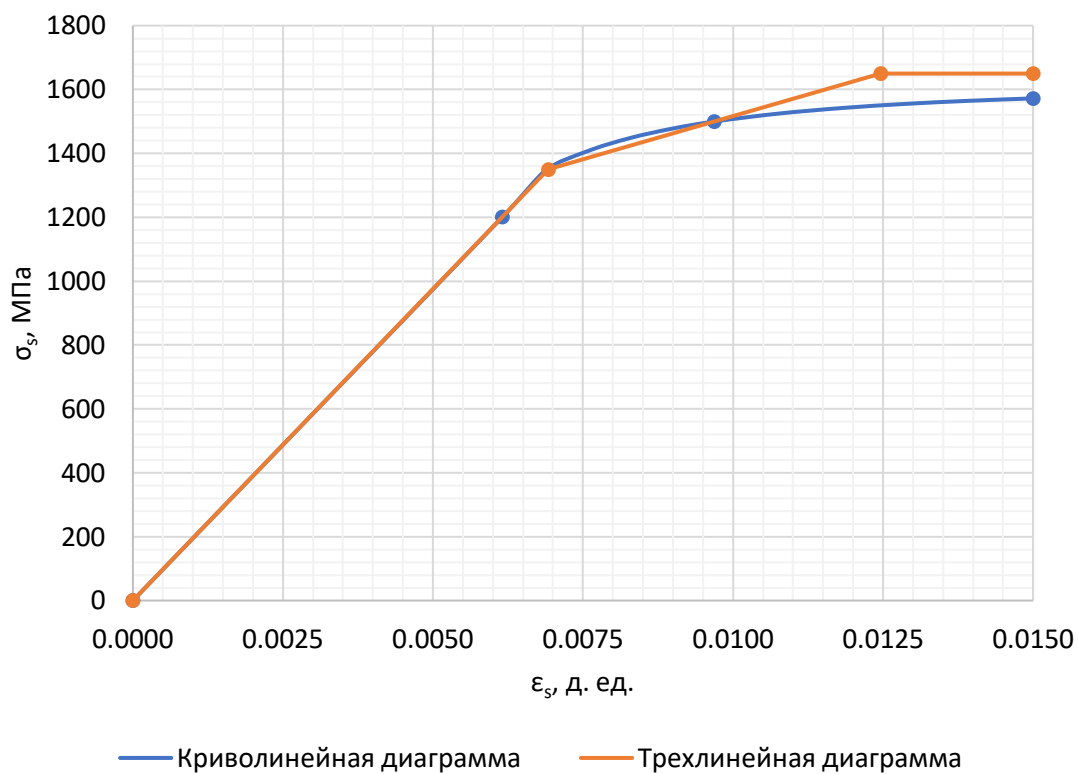
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1450

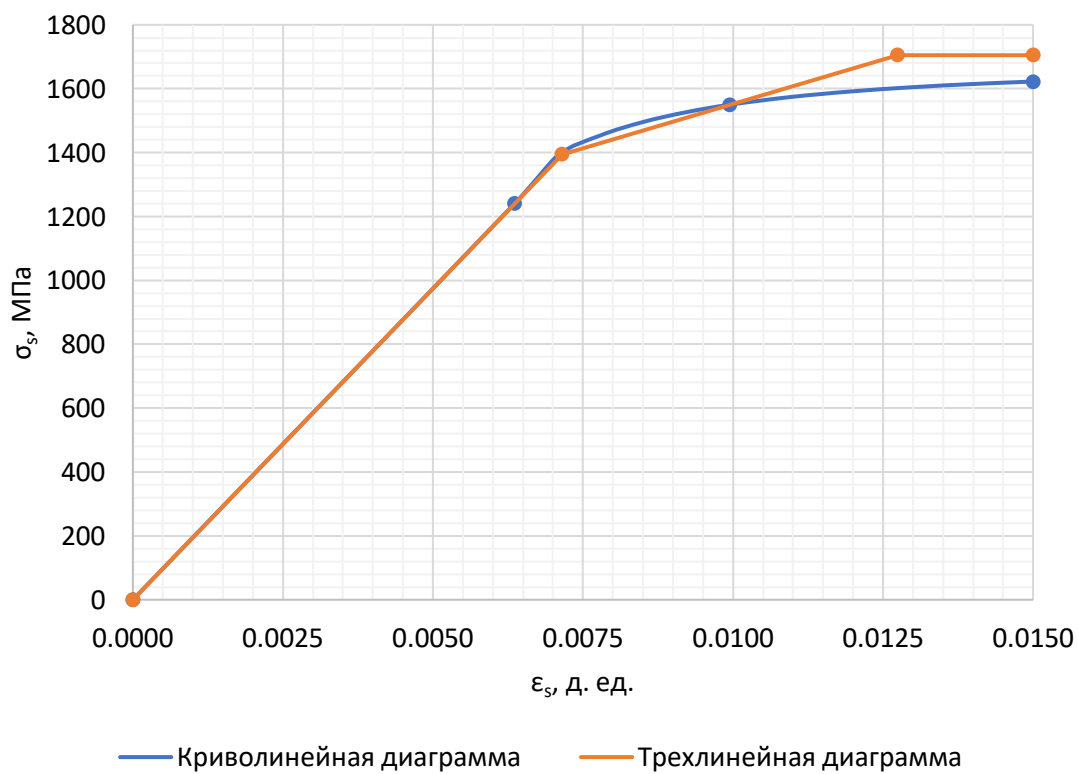


— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

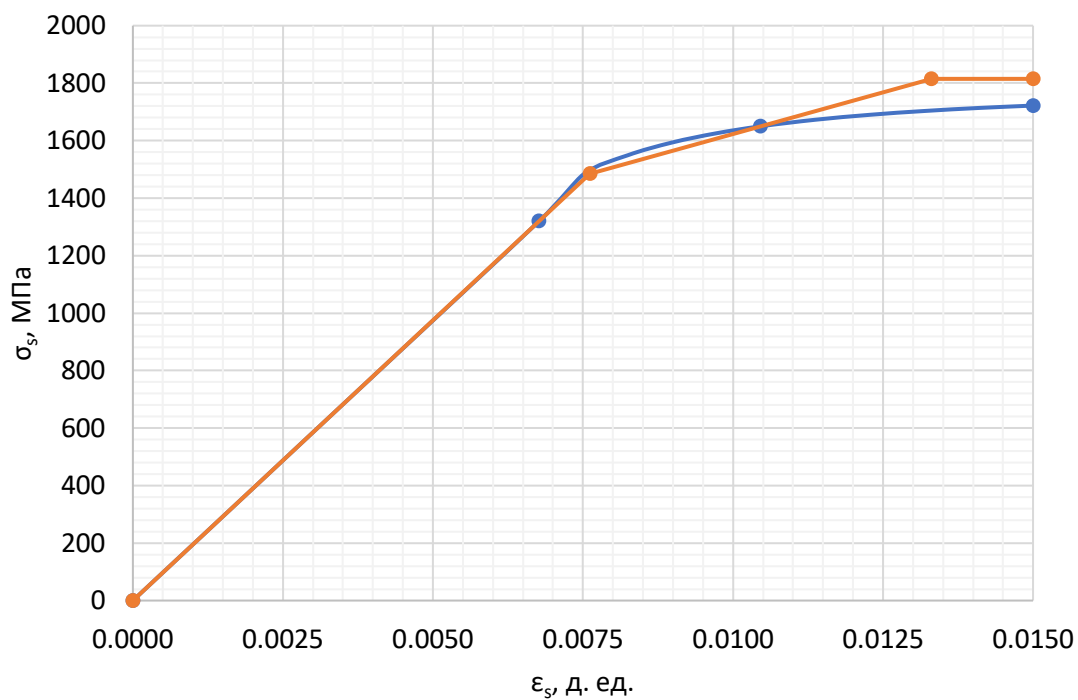
Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1500



Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1550

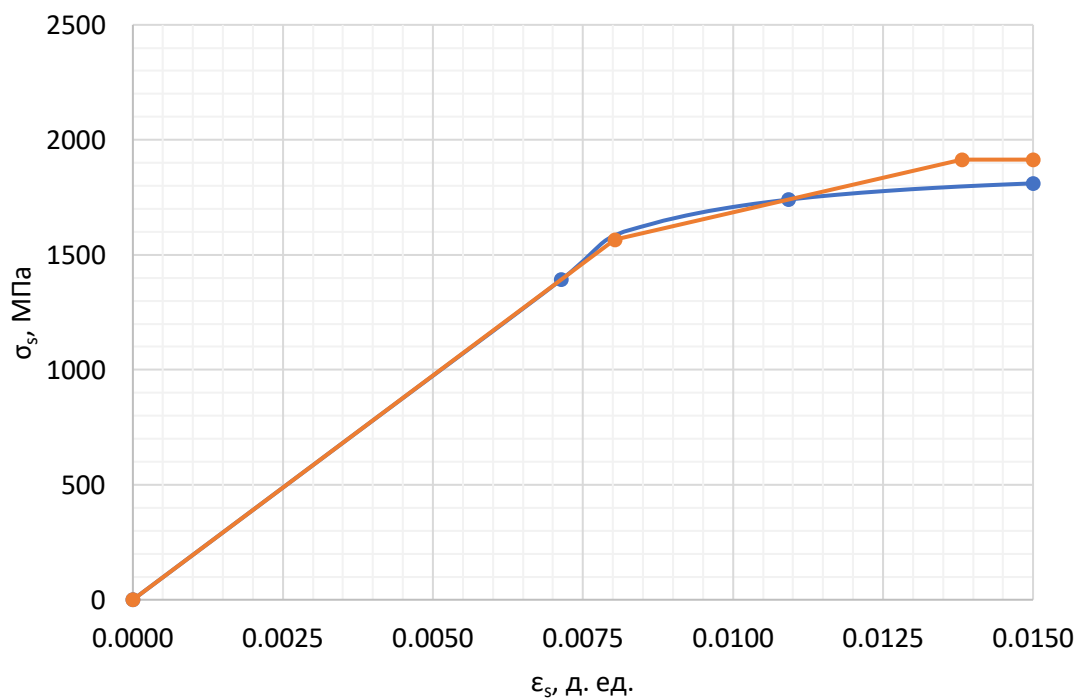


Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1650

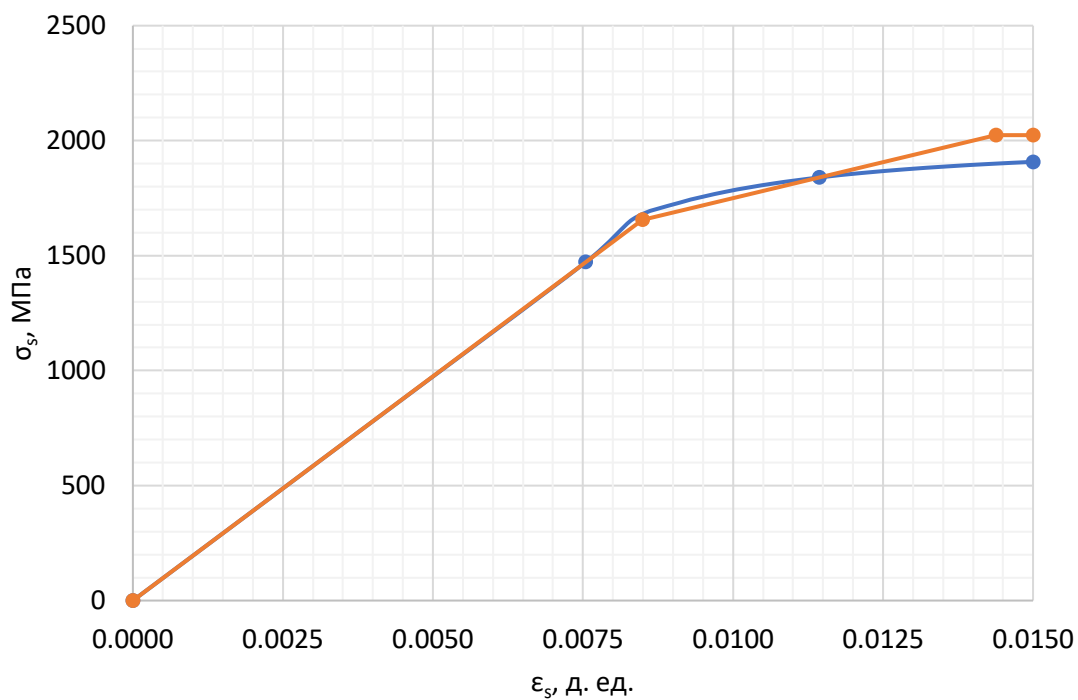


— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

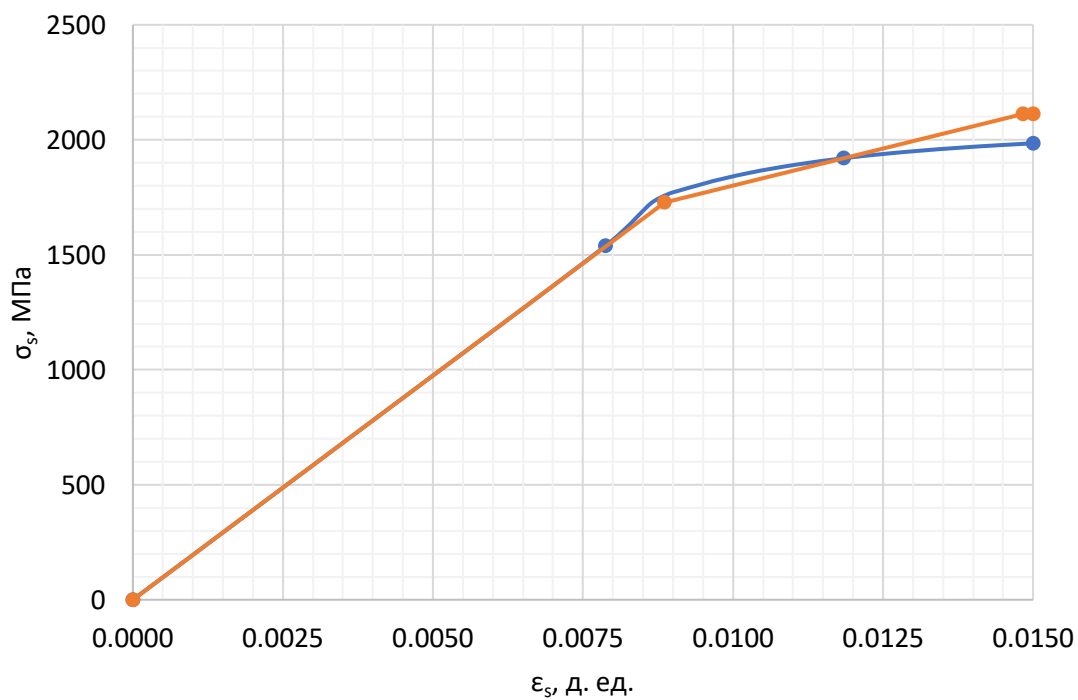
Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса K1750



— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

**Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса
К1850**

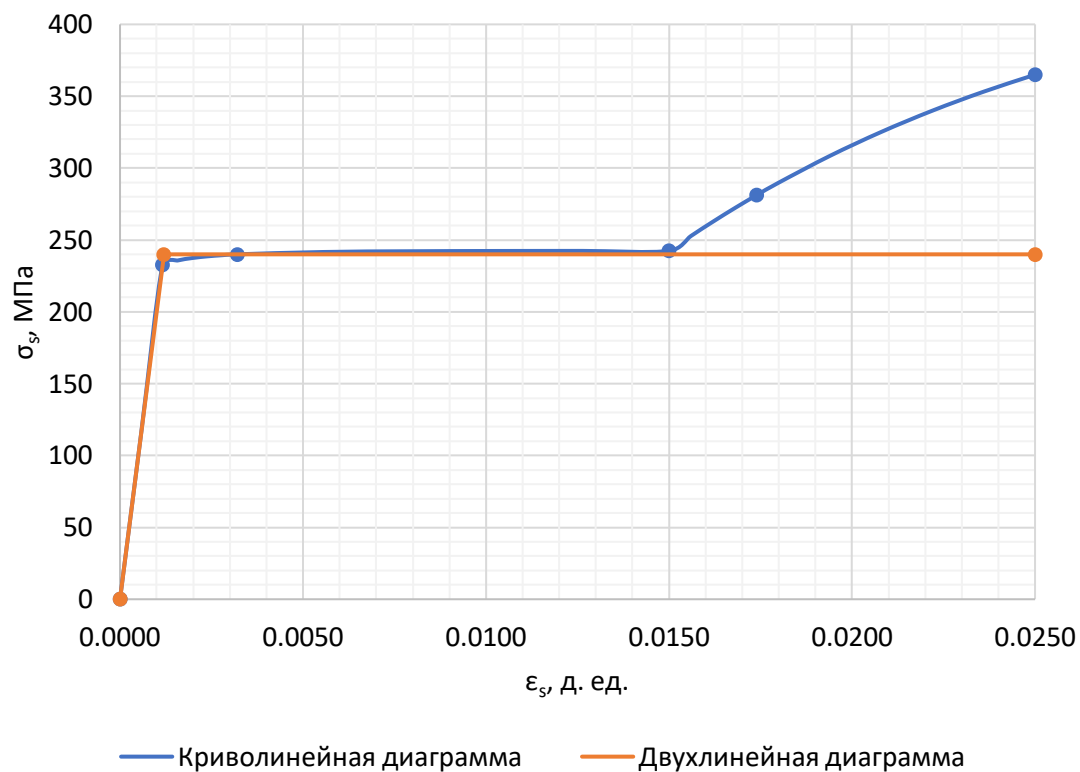
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

**Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса
К1900**

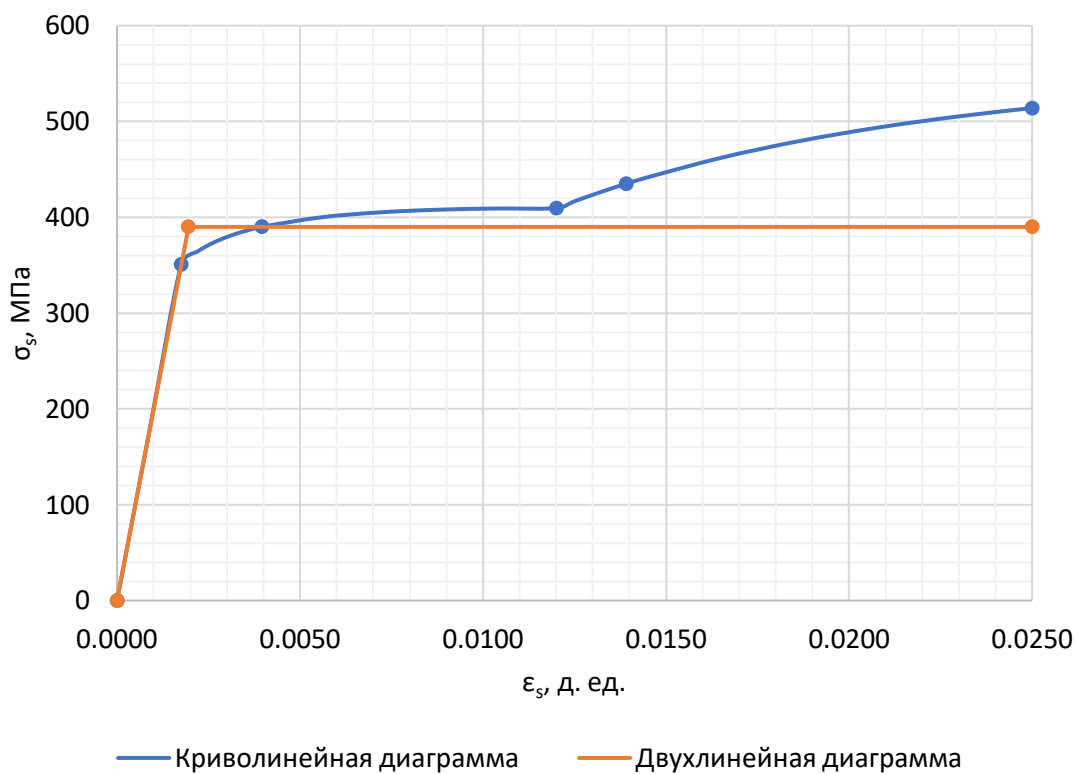
— Криволинейная диаграмма — Трехлинейная диаграмма

8.5 Нормативные диаграммы деформирования арматуры с физической площадкой текучести

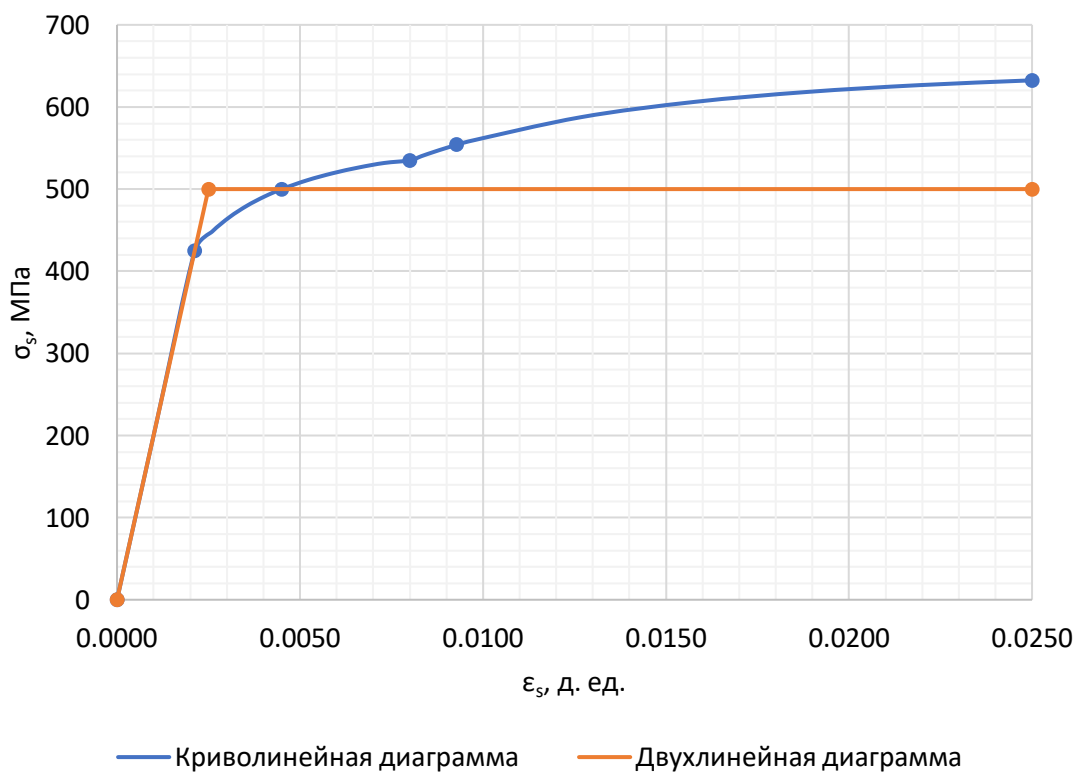
Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса A240

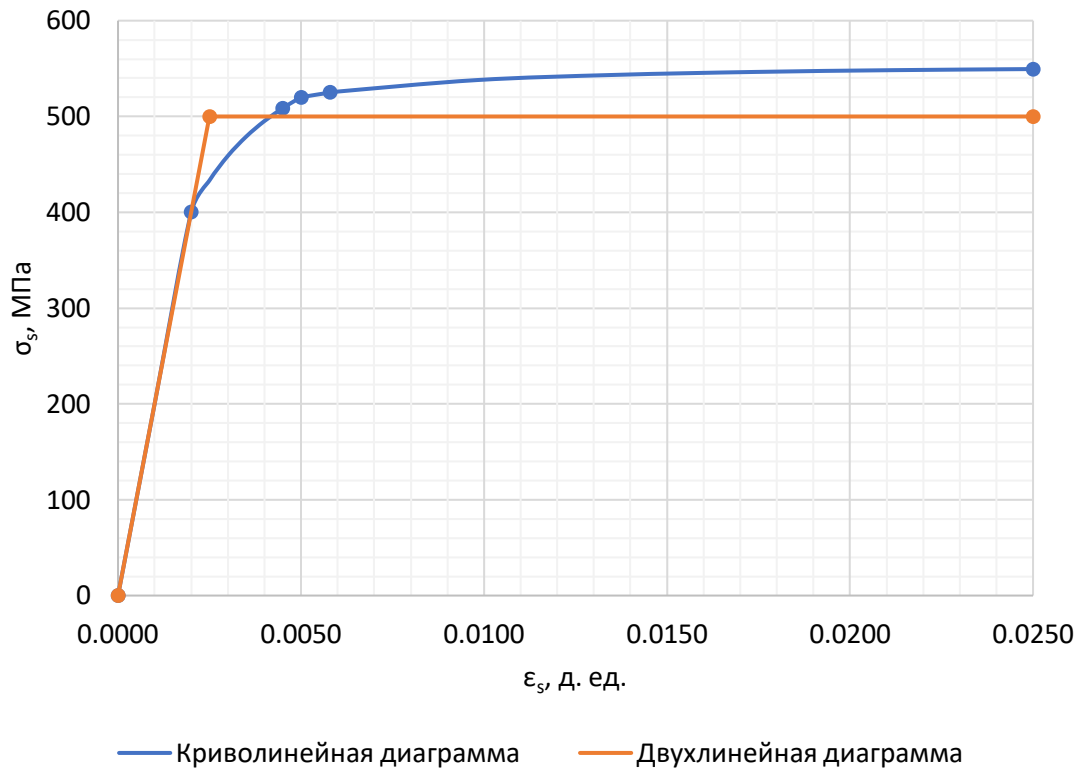


Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса A400



Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса A500



**Нормативные диаграммы деформирования арматуры класса
B500**

9 Верификационные задачи

9.1 Общие пояснения к верификационным задачам

Расчеты в приложении NDM выполнены с использованием криволинейных диаграмм деформирования тяжелого бетона и арматуры (ненапрягаемой и напрягаемой) в соответствии с методическим пособием «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии», разработанным ФАУ «ФЦС» [2], а также с использованием кусочно-линейных диаграмм деформирования в соответствии с СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» [1].

Для всех верификационных задач размер сети элементарных элементов принят 10×10 мм. При использовании других размеров результаты могут незначительно отличаться.

Алгоритм итерационного поиска решения на базе нелинейной деформационной модели основан на постепенном увеличении обобщенных деформаций сечения и внутренних обобщенных усилий; параметр «Точность итерационных вычислений» фактически показывает, насколько внутренние усилия могут быть меньше внешних. Для всех верификационных задач точность итерационных вычислений принята 0,1 % (для практических задач в большинстве случаев достаточно точности 0,1-3,0 %).

Для вариантов кусочно-линейных диаграмм бетона во всех задачах применена трехлинейная диаграмма. Арматура во многих верификационных задачах расположена в один ряд, в том числе иногда в нарушение конструктивных требований, для точного соблюдения рабочей высоты сечений.

9.2 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительно напряженной арматуры

Задача 1.1 Несущая способность внецентренно сжатого бетонного элемента

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 1.

Исходные данные: межквартирная бетонная панель толщиной $h = 150$ мм, высотой $L = 2700$ мм, изготовленная в горизонтальном положении:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В15;
- коэффициент условий работы бетона $\gamma_b = 0,9$.

Полная нагрузка на погонный метр стены $N_{sh} = 700$ кН, в том числе от действия постоянных и длительных нагрузок – $N_l = 650$ кН.

Результат: несущая способность при всех расчетных сочетаниях нагрузок обеспечена.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Условная критическая сила $N_{cr,sh}$ при действии полной нагрузки	кН	1578,3	1571,3 ⁽¹⁾ / -0,4 %	
Условная критическая сила $N_{cr,l}$ при действии постоянных и длительных нагрузок	кН	1523,4	1516,3 ⁽¹⁾ / -0,5 %	
Предельная сжимающая сила $N_{ult,sh}$ при действии полной нагрузки	кН	846,7 ⁽²⁾	826 / -2,5 %	822 / -3,0 %
Предельная сжимающая сила $N_{ult,l}$ при действии постоянных и длительных нагрузок	кН	758,4 ⁽²⁾	743 / -2,1 %	739 / -2,6 %
Несущая способность	–	обеспечена	обеспечена	обеспечена

1. При генерации сети элементарных элементов 1×1 мм вместо 10×10 мм условная критическая сила при действии полной нагрузки составит $N_{cr,sh} = 1578,0$ кН, при действии постоянных и длительных нагрузок – $N_{cr,l} = 1523,0$ кН, т.е. при уменьшении размеров элементарных элементов условная критическая сила стремится к аналитической, вычисленной по [1].

2. Расчеты разработчиков (при действии полной нагрузки коэффициент влияния длительности действия нагрузки φ_l определялся при $N_l = 650$ кН, при действии постоянных и длительных нагрузок – $\varphi_l = 2$).

Задача 1.1: Диаграммы – кусочно-линейные (кратковременные нагрузки)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

[1] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
 [2] Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций
 при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	1000 мм
Высота сечения	h	=	150 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
----------------	--	---	-------------

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R _{bc}	=	8.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R _{bt}	=	0.75 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ _{bc}	=	0.900
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ _{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E _b	=	24000 МПа

ПРОДОЛЬНЫЙ ИЗГИБ

Расчетная плоскость		=	XOZ
Длина элемента	L _z	=	2700 мм
Коэффициент расчетной длины	μ _z	=	1.00
Коэффициент влияния длительности действия нагр.	φ _l	=	1.93
Дополнительный эксцентриситет	e _{t, z}	=	0.0 мм
Начальный эксцентриситет (с учетом e _{t, z})	e _{0, z}	=	10.0 мм
Условная критическая сила	N _{cr, z}	=	1571 кН
Коэффициент влияния продольного изгиба	η _z	=	1.8034

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-700.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	0.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-700.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	12.62 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	-699.8 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	12.62 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.079 %
Общее количество итераций	i	=	22

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	-0.000533
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.012315 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	200.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	1300.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	1312482 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	1686 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	109363 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	500.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	63.38 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	-11.62 мм

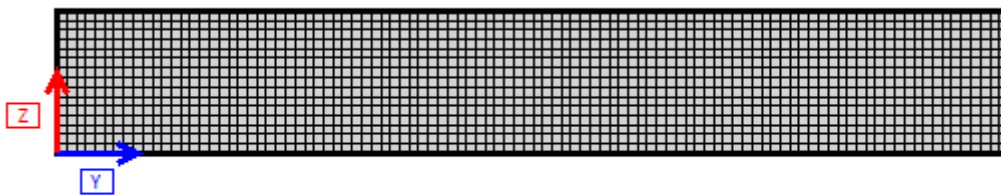
ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.000186
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.001539
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-6.87 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-5.38 МПа

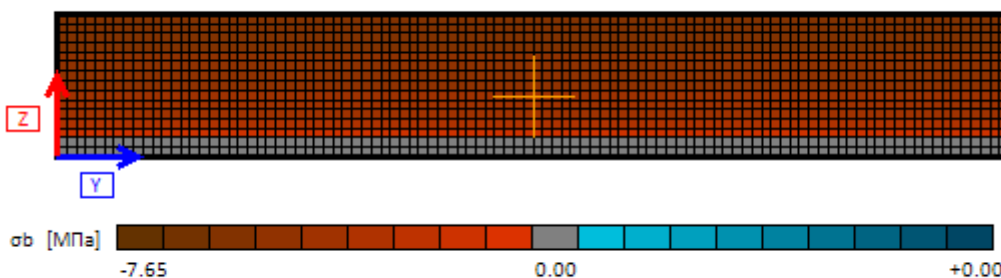
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.440

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.1: Диаграммы – криволинейные (кратковременные нагрузки)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

[1] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
 [2] Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций
 при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	1000 мм
Высота сечения	h	=	150 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
----------------	--	---	-------------

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.000
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	8.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	0.75 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	0.900
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	24000 МПа

ПРОДОЛЬНЫЙ ИЗГИБ

Расчетная плоскость		=	XOZ
Длина элемента	Lz	=	2700 мм
Коэффициент расчетной длины	μz	=	1.00
Коэффициент влияния длительности действия нагр.	ϕl	=	1.93
Дополнительный эксцентриситет	e _{t,z}	=	0.0 мм
Начальный эксцентриситет (с учетом e _{t,z})	e _{0,z}	=	10.0 мм
Условная критическая сила	N _{cr,z}	=	1571 кН
Коэффициент влияния продольного изгиба	ηz	=	1.8034

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-700.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	0.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-700.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	12.62 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	-699.8 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	12.62 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.073 %
Общее количество итераций	i	=	15

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε_x	=	-0.000343
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.006160 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	0.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	1500.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	2040656 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	3690 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	170038 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	500.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	60.56 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	-14.44 мм

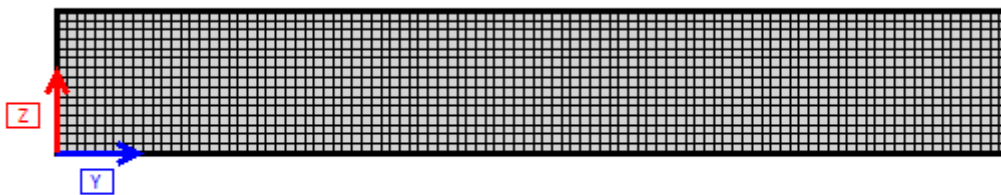
ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,max}$	=	-0.000001
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,min}$	=	-0.000863
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	-0.02 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-6.92 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-4.67 МПа

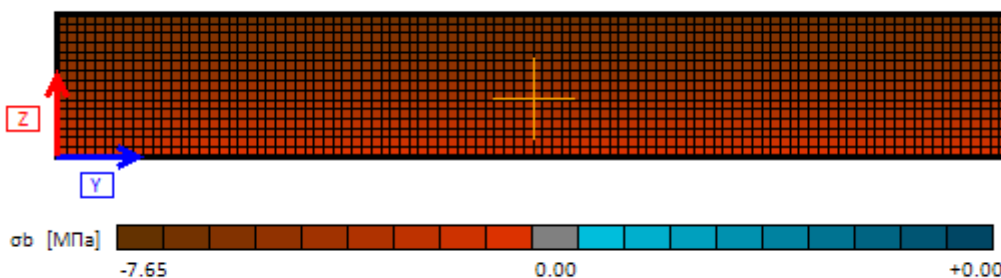
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.247

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.1: Диаграммы – кусочно-линейные (постоянные и длительные нагрузки)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

[1] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
 [2] Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций
 при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	1000 мм
Высота сечения	h	=	150 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
----------------	--	---	-------------

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R _{bc}	=	8.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R _{bt}	=	0.75 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ _{bc}	=	0.810
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ _{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E _b	=	24000 МПа

ПРОДОЛЬНЫЙ ИЗГИБ

Расчетная плоскость		=	XOZ
Длина элемента	L _z	=	2700 мм
Коэффициент расчетной длины	μ _z	=	1.00
Коэффициент влияния длительности действия нагр.	φ _l	=	2.00
Дополнительный эксцентриситет	e _{t, z}	=	0.0 мм
Начальный эксцентриситет (с учетом e _{t, z})	e _{0, z}	=	10.0 мм
Условная критическая сила	N _{cr, z}	=	1516 кН
Коэффициент влияния продольного изгиба	η _z	=	1.7503

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-650.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	0.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-650.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	11.38 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	-649.8 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	11.37 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.091 %
Общее количество итераций	i	=	23

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε_x	=	-0.000564
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.013043 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	200.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	1300.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	1151935 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	1498 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	95985 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	500.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	62.45 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	-12.55 мм

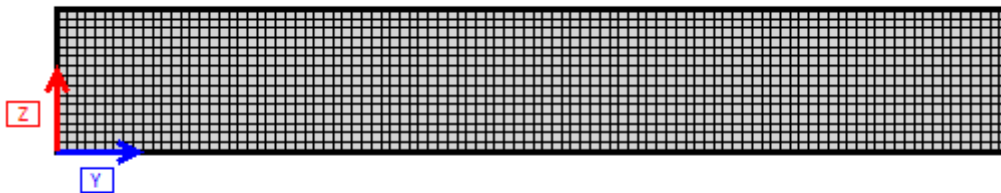
ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,max}$	=	0.000185
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,min}$	=	-0.001641
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-6.34 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-5.00 МПа

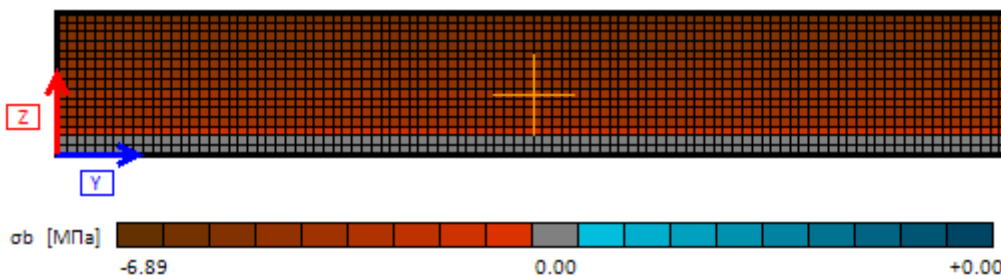
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.469

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.1: Диаграммы – криволинейные (постоянные и длительные нагрузки)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

[1] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
 [2] Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций
 при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	1000 мм
Высота сечения	h	=	150 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
----------------	--	---	-------------

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.000
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	8.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	0.75 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	0.810
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	24000 МПа

ПРОДОЛЬНЫЙ ИЗГИБ

Расчетная плоскость		=	XOZ
Длина элемента	Lz	=	2700 мм
Коэффициент расчетной длины	μ_z	=	1.00
Коэффициент влияния длительности действия нагр.	ϕ_l	=	2.00
Дополнительный эксцентриситет	e _{t,z}	=	0.0 мм
Начальный эксцентриситет (с учетом e _{t,z})	e _{0,z}	=	10.0 мм
Условная критическая сила	N _{cr,z}	=	1516 кН
Коэффициент влияния продольного изгиба	η_z	=	1.7503

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-650.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	0.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-650.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	11.38 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	-649.9 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	11.37 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.069 %
Общее количество итераций	i	=	19

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	-0.000385
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.006255 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	100.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	1400.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	1689252 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	2665 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	140757 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	500.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	66.86 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	-8.14 мм

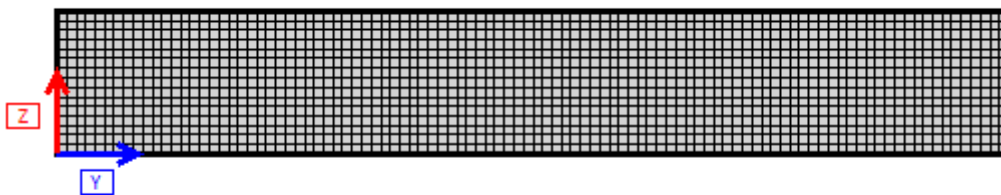
ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.000002
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.000874
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-6.31 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-4.64 МПа

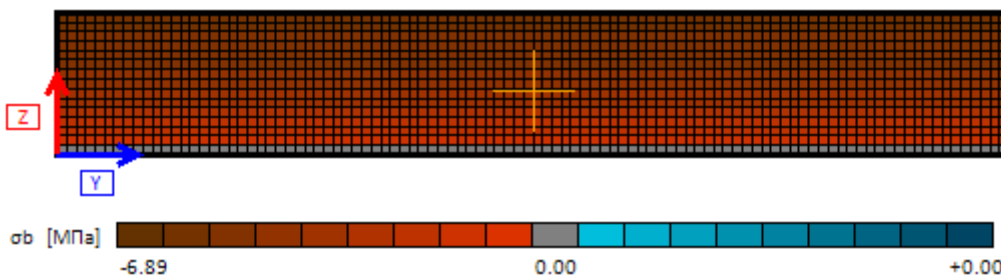
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.250

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.2 Несущая способность изгибаемого ж.б. элемента прямоугольного сечения (разрушение по растянутой арматуре)

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 3.

Исходные данные: железобетонный элемент прямоугольного сечения с размерами $b = 300$ мм, $h = 800$ мм, $a = 70$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие B25;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне $6\emptyset 25$ A400 (для целей верификации арматура в расчете расположена в один ряд).

Полный изгибающий момент $M_{sh} = 550$ кН·м.

Результат: несущая способность обеспечена.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Предельный изгибающий момент $M_{ult,sh}$ при действии полной нагрузки ⁽¹⁾	кН·м	630,3	633 ⁽²⁾ / +0,4 %	625 / -0,8 %
Несущая способность	–	обеспечена	обеспечена	обеспечена

1. При проведении расчетов изгибаемых элементов необходимо анализировать жесткостные характеристики нагруженных сечений во избежание чрезмерного роста прогибов (особенно для слабоармированных элементов).

2. Криволинейная диаграмма бетона принята с учетом влияния градиентов деформаций.

Задача 1.2: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	800 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
----------------	--	---	-------------

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	двухлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (6 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	70.0	25.0	75.0	70.0	25.0	137.0	70.0	25.0
163.0	70.0	25.0	225.0	70.0	25.0	250.0	70.0	25.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	625.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	625.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.099 %
Общее количество итераций	i	=	827

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	1/ry	=	0.011767 1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/rz	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	At	=	1560.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	Ac	=	840.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	1102975 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	53113 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	7826 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	516.61 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	138.06 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.006020
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.003276
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-12.27 МПа

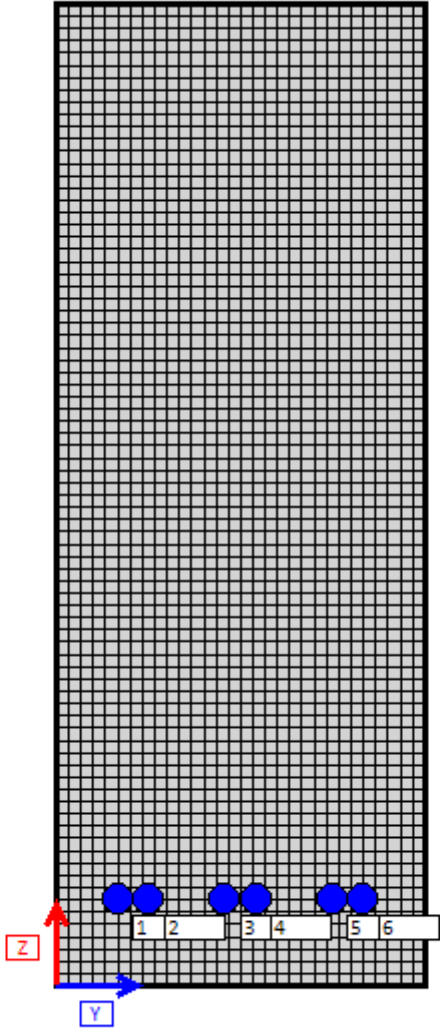
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.005255
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	0.005255
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	350.00 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	350.00 МПа

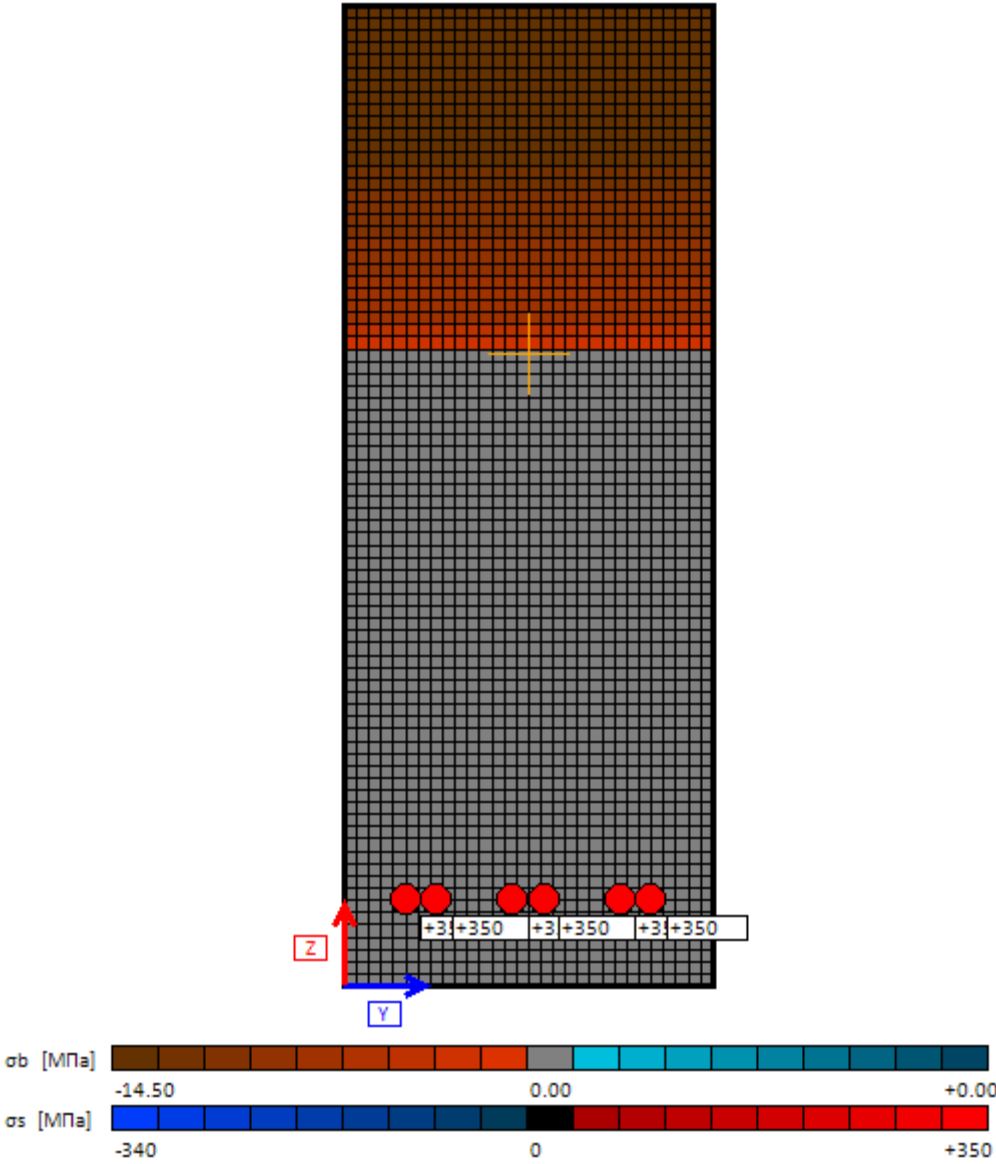
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.936
Коэффициент использования ненапрягаемой арматуры	k_s	=	0.210
Коэффициент упругой работы ненапрягаемой арматуры	$k_{s,el}$	=	3.003
Остаточные деформации в ненапрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.2: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

[1] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
 [2] Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций
 при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	800 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
----------------	--	---	-------------

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	0.907
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (6 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	70.0	25.0	75.0	70.0	25.0	137.0	70.0	25.0
163.0	70.0	25.0	225.0	70.0	25.0	250.0	70.0	25.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	633.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	633.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.099 %
Общее количество итераций	i	=	634

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	1/ry	=	0.011431 1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/rz	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	At	=	1530.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	Ac	=	870.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	1149852 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	55375 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	8149 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	511.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	132.46 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.005784
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.003246
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-12.09 МПа

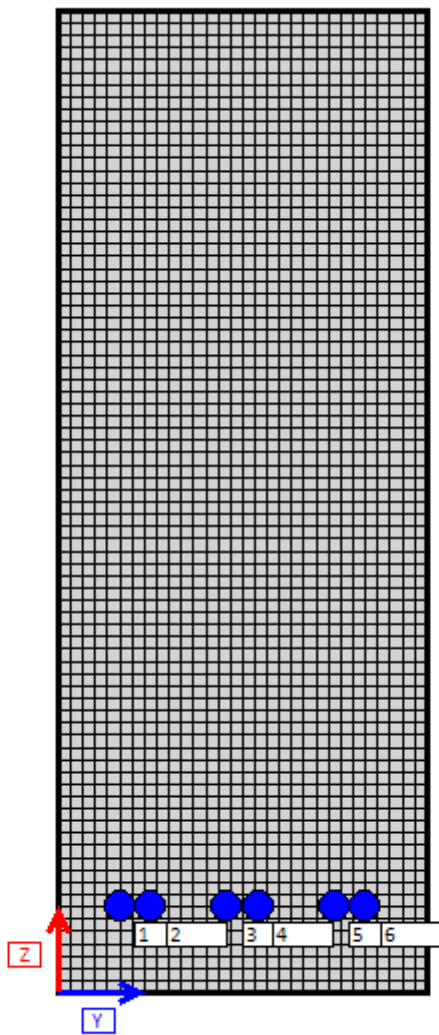
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.005041
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	0.005041
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	357.25 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	357.25 МПа

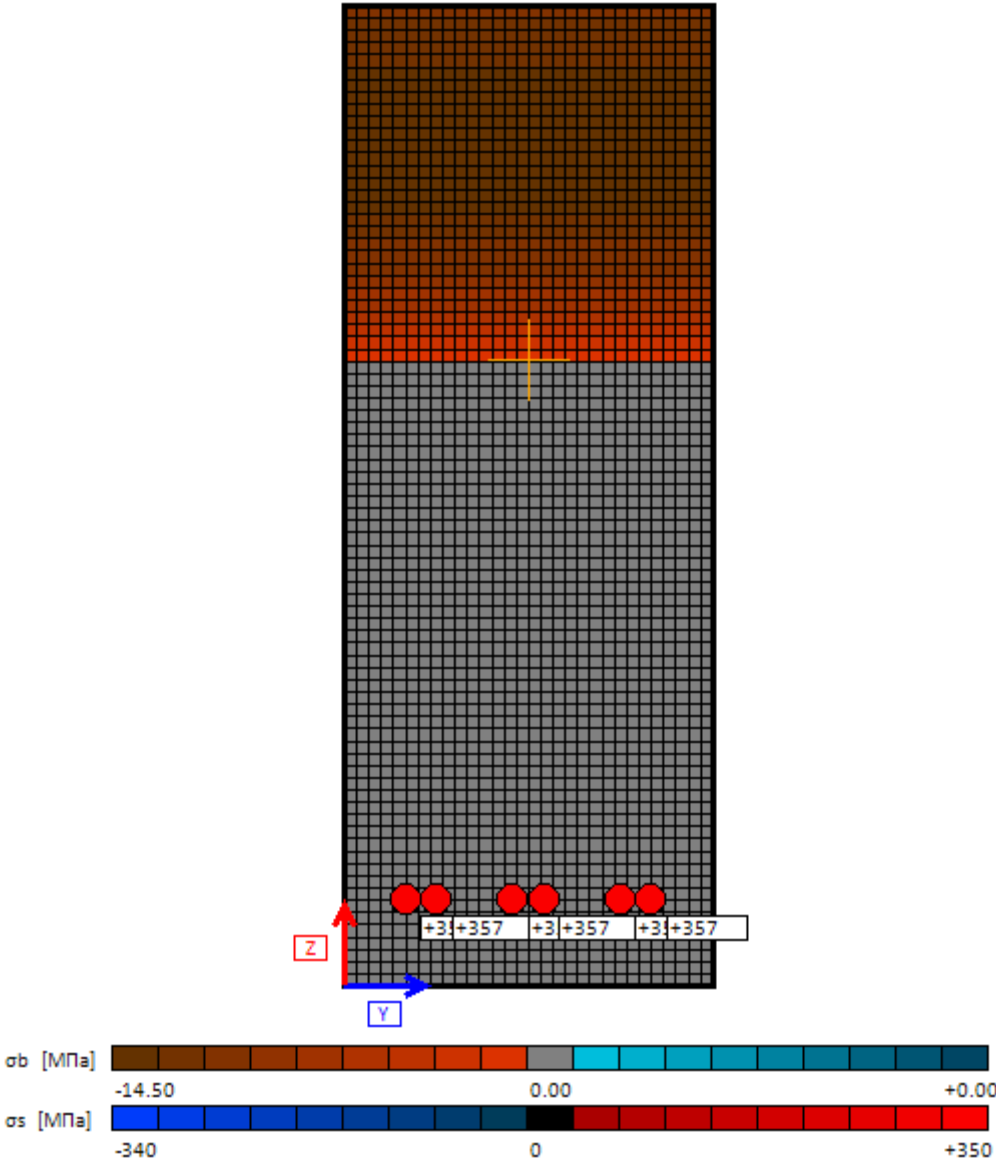
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.934
Коэффициент использования ненапрягаемой арматуры	k_s	=	0.202
Коэффициент упругой работы ненапрягаемой арматуры	$k_{s,el}$	=	1.344
Остаточные деформации в ненапрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.3 Несущая способность изгибаемого ж.б. элемента прямоугольного сечения (разрушение по сжато-растянутому бетону)

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 6.

Исходные данные: железобетонный элемент прямоугольного сечения с размерами $b = 300$ мм, $h = 700$ мм, $a = 70$ мм, $a' = 30$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В20;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне $6\emptyset 32$ А400 (для целей верификации арматура в расчете расположена в один ряд);
- ненапрягаемая арматура в сжатой зоне $3\emptyset 12$ А400.

Полный изгибающий момент $M_{sh} = 630$ кН·м.

Результат: несущая способность обеспечена.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Предельный изгибающий момент $M_{ult,sh}$ при действии полной нагрузки ⁽¹⁾	кН·м	635,7	629 / -1,1 %	635 / -0,1 %
Несущая способность	–	обеспечена	не обеспечена	обеспечена

1. При проведении расчетов изгибаемых элементов необходимо анализировать жесткостные характеристики нагруженных сечений во избежание чрезмерного роста прогибов (особенно для слабоармированных элементов).

Задача 1.3: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	700 мм

ПАРАМЕТРЫ

Ограничение сжимающих напряжений в арматуре (R_{sc})	=	нет
--	---	-----

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B20
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R_{bc}	=	11.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R_{bt}	=	0.90 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	=	27500 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	двухлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R_s	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R_{sc}	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	E_s	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (9 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	70.0	32.0	90.0	70.0	32.0	130.0	70.0	32.0
170.0	70.0	32.0	210.0	70.0	32.0	250.0	70.0	32.0
50.0	670.0	12.0	150.0	670.0	12.0	250.0	670.0	12.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	635.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	635.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.085 %
Общее количество итераций	i	=	83

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.007944 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	780.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	1320.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	2131794 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	79930 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	13216 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	255.28 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	-62.57 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.001988
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.003493
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-11.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-9.89 МПа

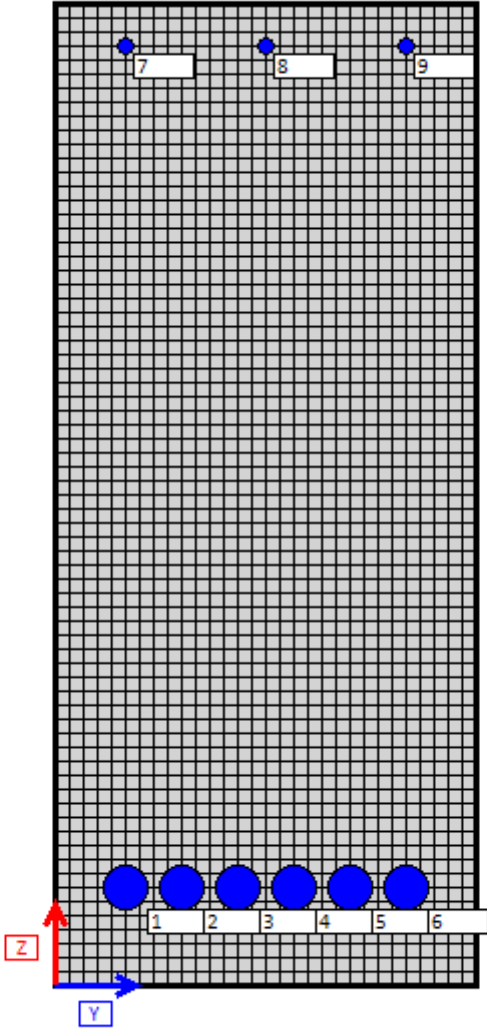
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.001472
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	-0.003295
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	294.38 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	-350.00 МПа

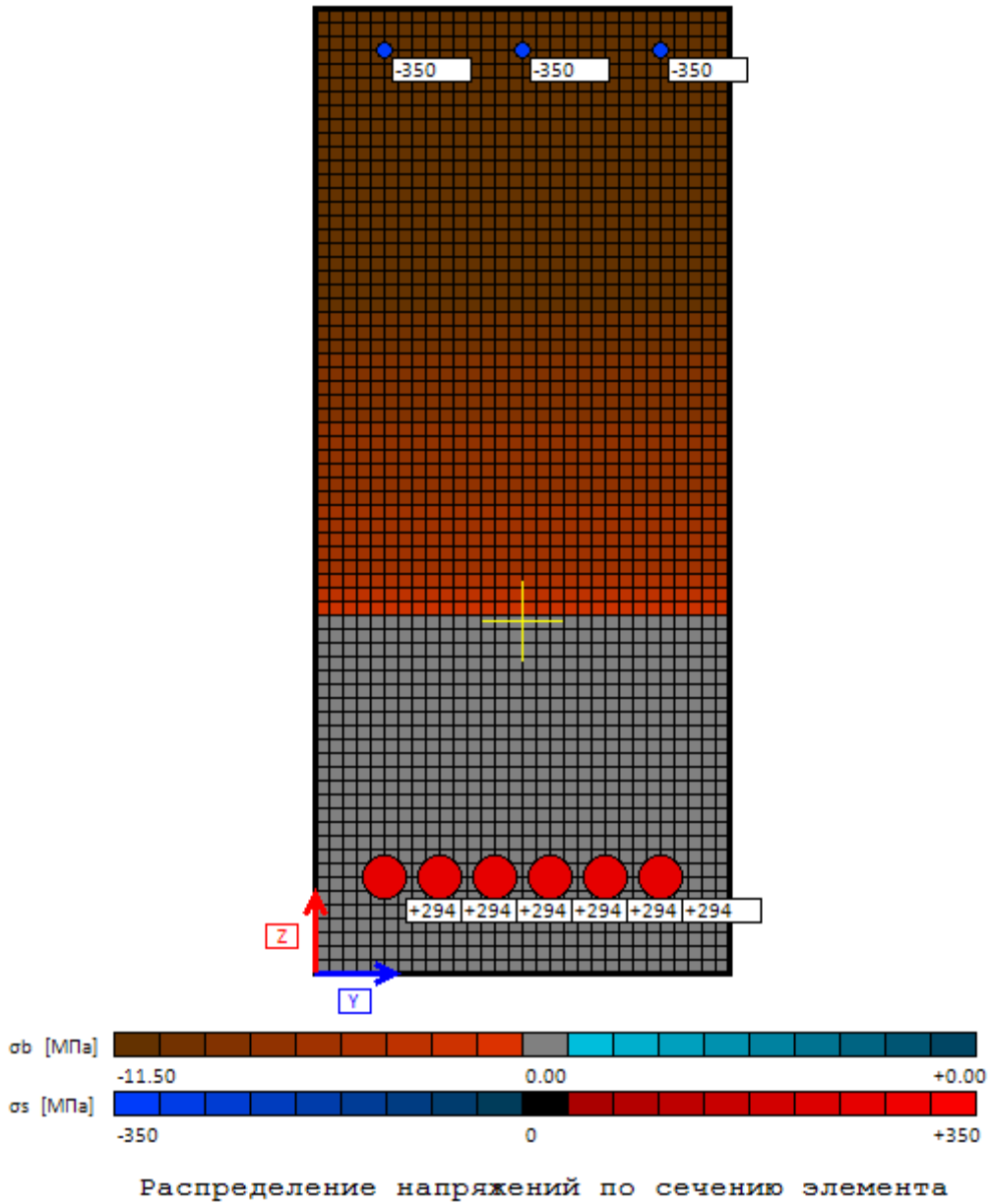
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.998
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	0.841

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Задача 1.3: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
- Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	700 мм

ПАРАМЕТРЫ

Ограничение сжимающих напряжений в арматуре (Rsc) = нет

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B20
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.000
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	11.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	0.90 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	27500 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (9 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	70.0	32.0	90.0	70.0	32.0	130.0	70.0	32.0
170.0	70.0	32.0	210.0	70.0	32.0	250.0	70.0	32.0
50.0	670.0	12.0	150.0	670.0	12.0	250.0	670.0	12.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	629.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	629.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.099 %
Общее количество итераций	i	=	549

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.007932 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	780.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	1320.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	2130976 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	79303 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	13210 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	256.43 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	-61.41 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,max}$	=	0.001994
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,min}$	=	-0.003479
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-11.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-9.95 МПа

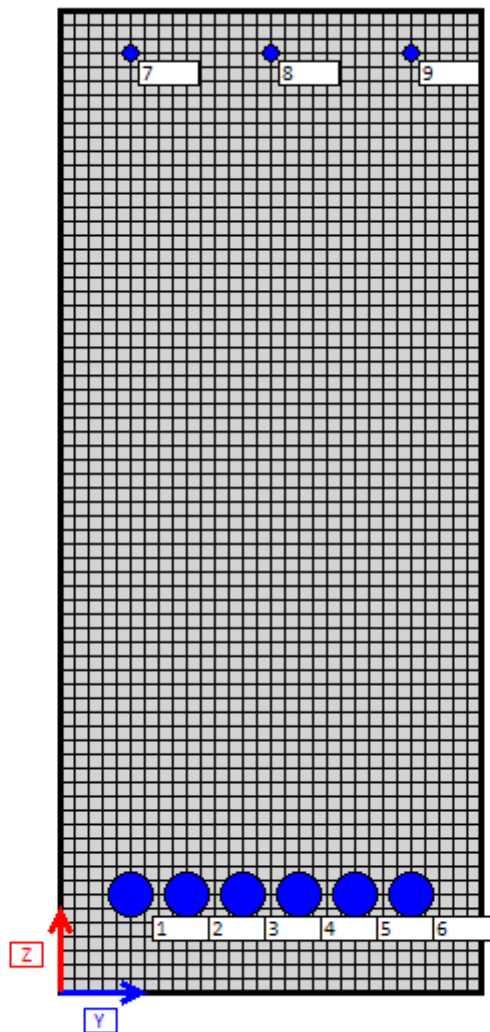
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\varepsilon_{s,max}$	=	0.001479
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\varepsilon_{s,min}$	=	-0.003280
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	295.74 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	-346.03 МПа

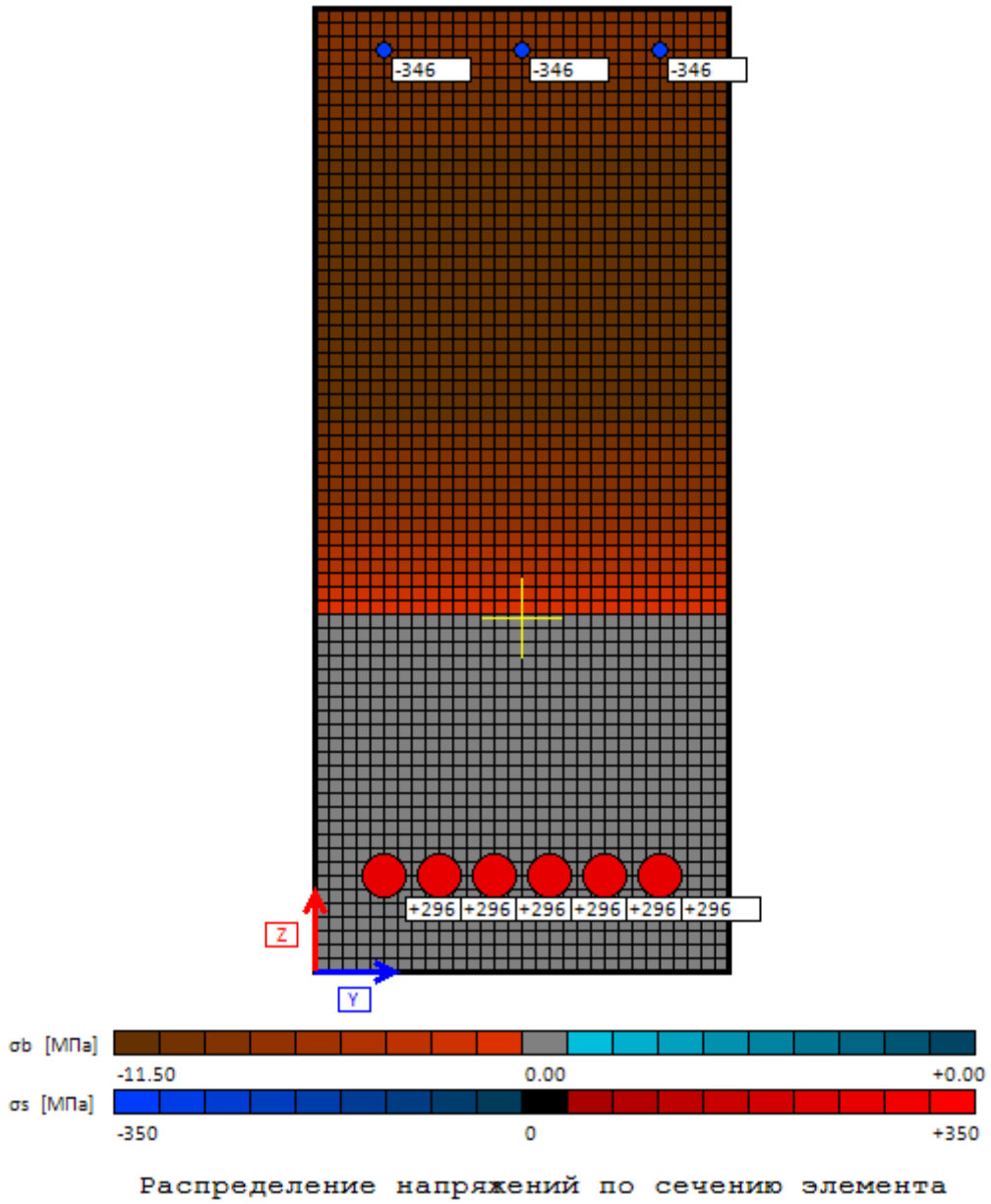
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.994
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	0.394

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Задача 1.4 Несущая способность изгибаемого ж.б. элемента таврового сечения

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 9.

Исходные данные: железобетонный элемент таврового сечения с размерами $b = 200$ мм, $h = 600$ мм, $b_f = 400$ мм, $h_f = 100$ мм, $a = 70$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В25;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне $4\varnothing 25$ А400 (для целей верификации арматура в расчете расположена в один ряд).

Полный изгибающий момент $M_{sh} = 300$ кН·м.

Результат: несущая способность обеспечена.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Предельный изгибающий момент $M_{ult,sh}$ при действии полной нагрузки ⁽¹⁾	кН·м	326,0	328 ⁽²⁾ / +0,6 %	321 / -1,5 %
Несущая способность	–	обеспечена	обеспечена	обеспечена

1. При проведении расчетов изгибаемых элементов необходимо анализировать жесткостные характеристики нагруженных сечений во избежание чрезмерного роста прогибов (особенно для слабоармированных элементов).

2. Криволинейная диаграмма бетона принята с учетом влияния градиентов деформаций.

Задача 1.4: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	тавровое
Ширина ребра сечения	b	=	200 мм
Полная высота сечения	h	=	600 мм
Ширина полки сечения	bf	=	400 мм
Высота полки сечения	hf	=	100 мм

ПАРАМЕТРЫ

Ограничение сжимающих напряжений в арматуре (Rsc) = нет

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	двухлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (4 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	70.0	25.0	80.0	70.0	25.0	120.0	70.0	25.0
160.0	70.0	25.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	321.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	321.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.099 %
Общее количество итераций	i	=	1054

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	1/ry	=	0.020486 1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/rz	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	At	=	860.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	Ac	=	540.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	602907 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	15669 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	4400 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	100.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	433.83 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	117.68 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.008785
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.003302
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-12.73 МПа

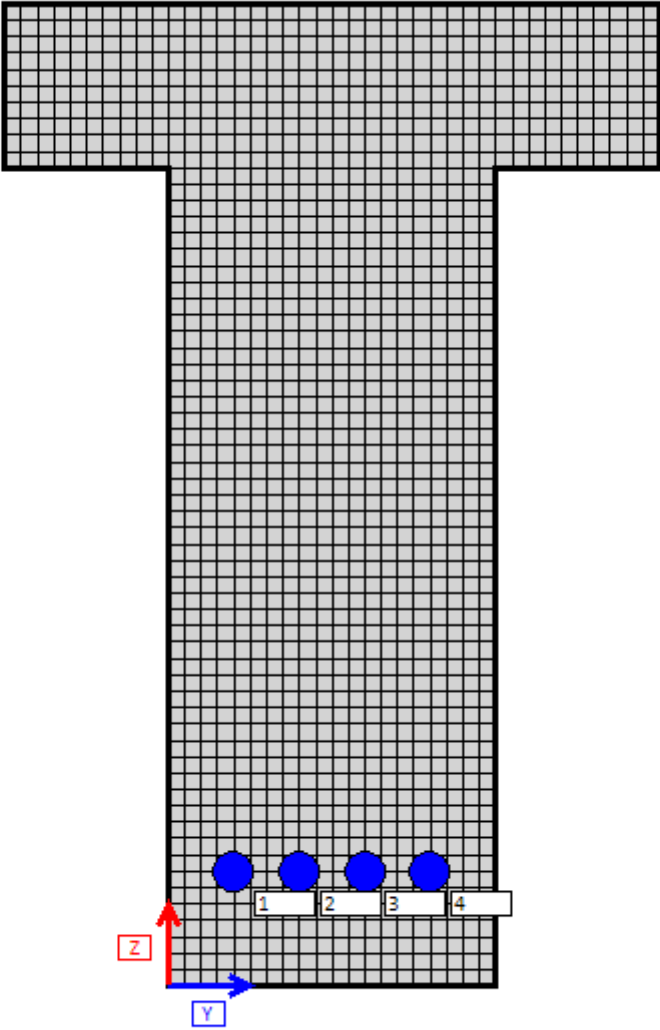
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.007453
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	0.007453
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	350.00 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	350.00 МПа

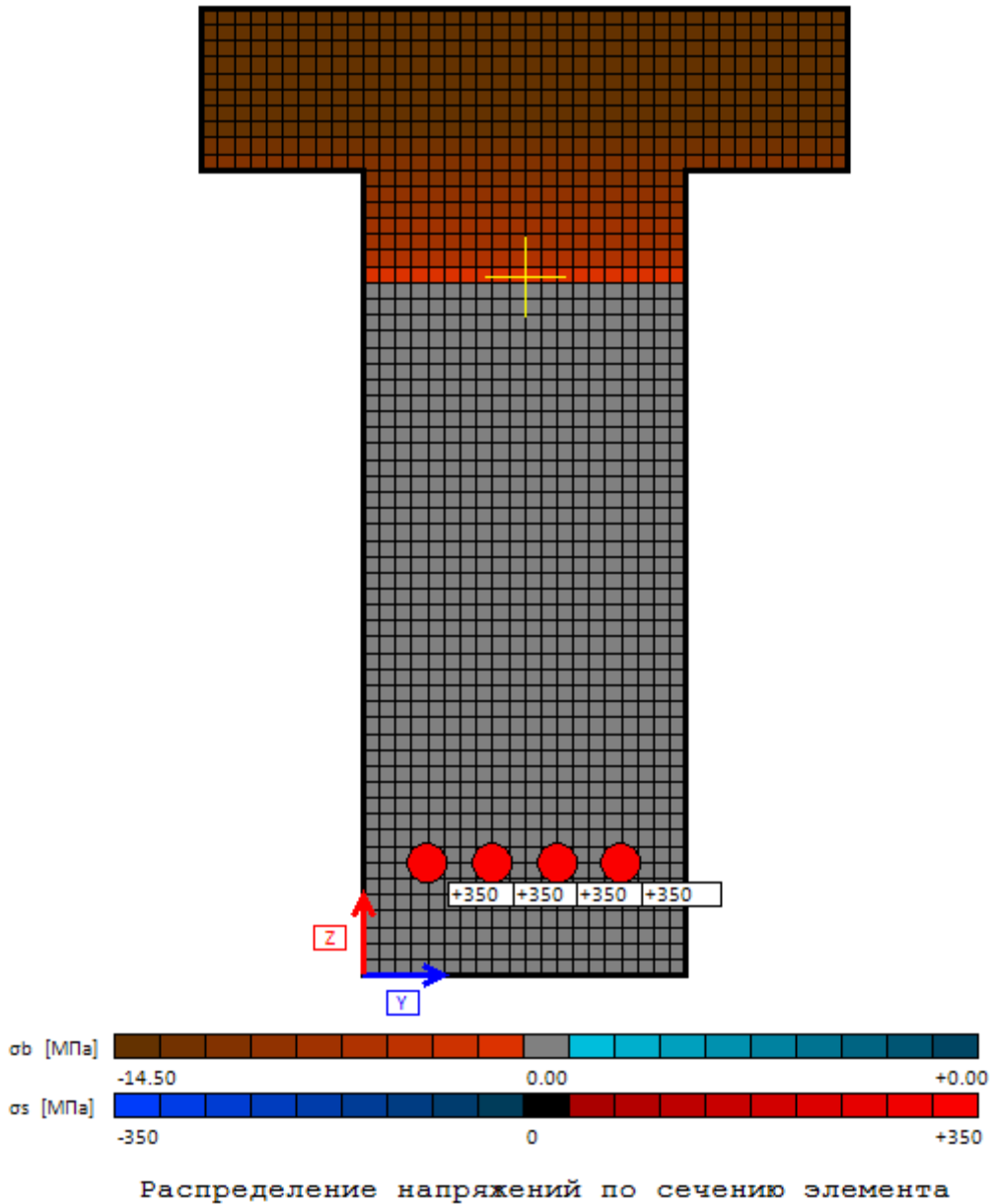
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.943
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	4.259
Остаточные деформации в ненапрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Задача 1.4: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
2. Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	тавровое
Ширина ребра сечения	b	=	200 мм
Полная высота сечения	h	=	600 мм
Ширина полки сечения	bf	=	400 мм
Высота полки сечения	hf	=	100 мм

ПАРАМЕТРЫ

Ограничение сжимающих напряжений в арматуре (Rsc) = нет

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	0.907
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (4 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	70.0	25.0	80.0	70.0	25.0	120.0	70.0	25.0
160.0	70.0	25.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	328.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	328.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.099 %
Общее количество итераций	i	=	338

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.016257 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	840.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	560.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	703466 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	20176 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	5086 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	100.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	423.39 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	107.24 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,max}$	=	0.006802
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,min}$	=	-0.002790
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-12.62 МПа

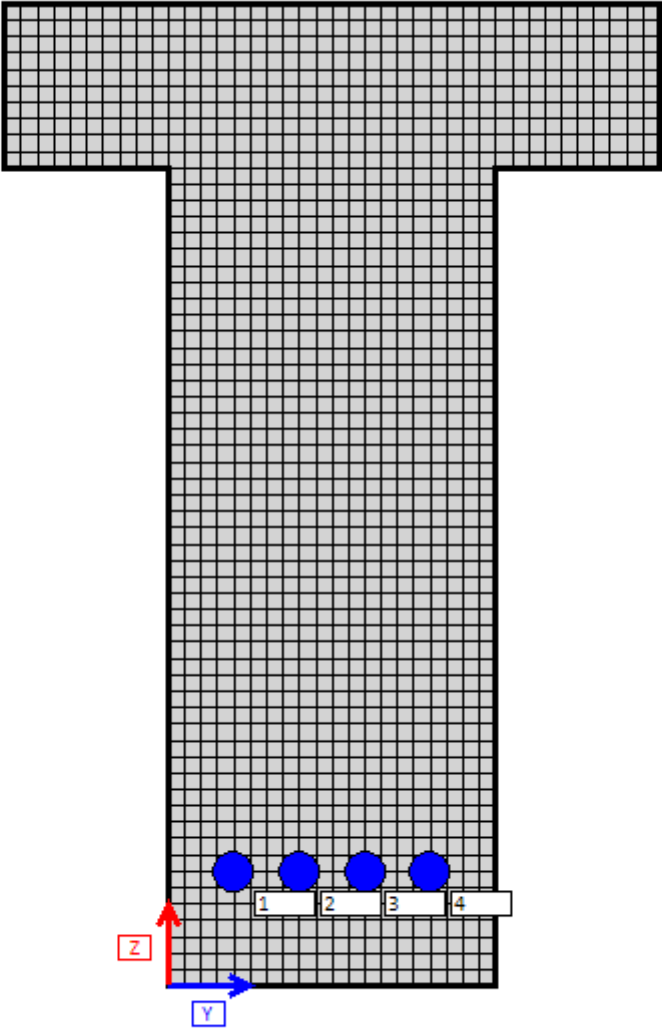
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\varepsilon_{s,max}$	=	0.005745
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\varepsilon_{s,min}$	=	0.005745
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	359.85 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	359.85 МПа

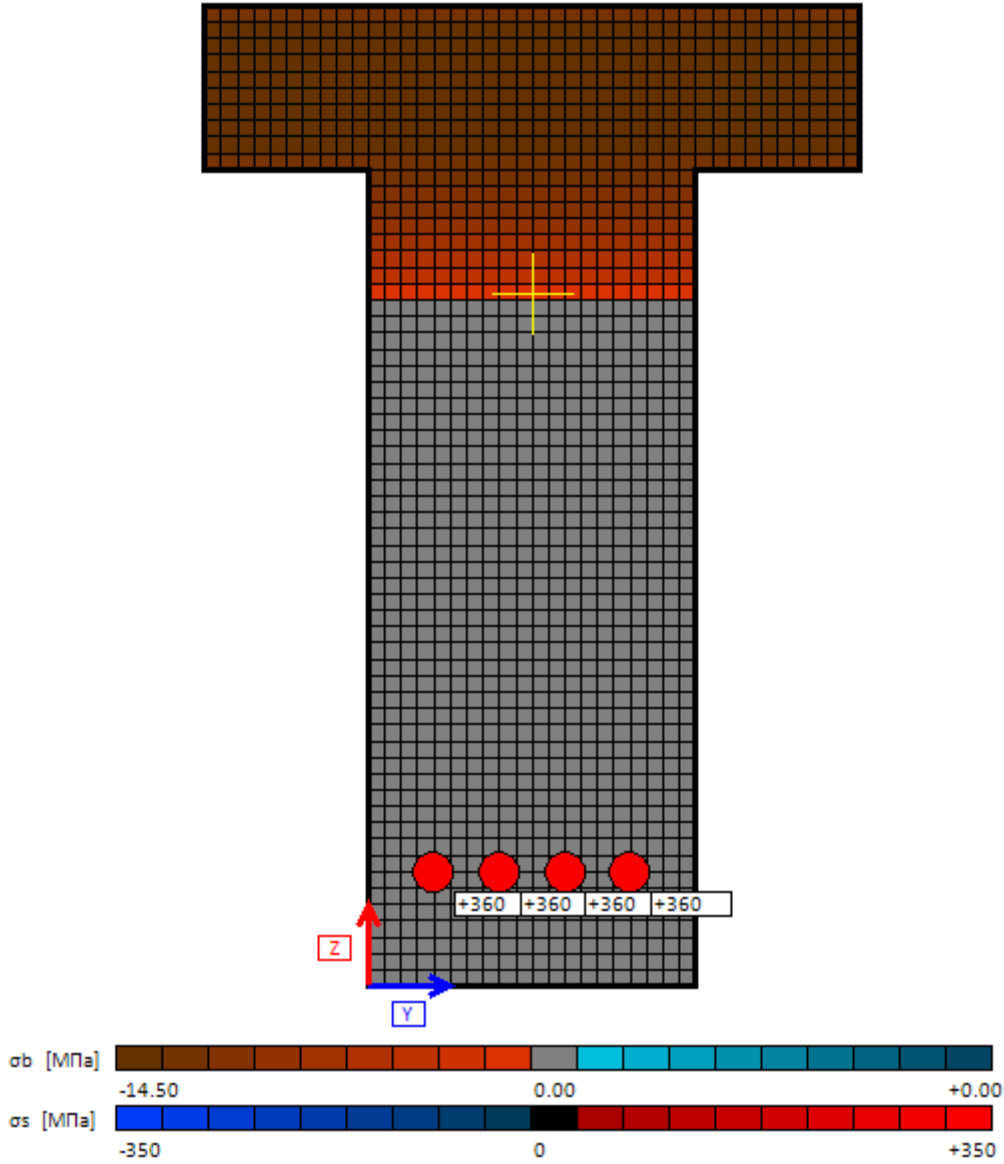
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.803
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	1.532
Остаточные деформации в ненапрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.5 Несущая способность ж.б. элемента при косом изгибе

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 10.

Исходные данные: железобетонный прогон кровли с уклоном 1:4 таврового сечения со скошенными внутренними гранями полки с размерами $b = 150$ мм, $h = 400$ мм, $b_f = 300$ мм, $h_f = 80$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В25;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне $3\phi 18$ А400.

Полный изгибающий момент в вертикальной плоскости $M_{sh} = 82,6$ кН·м.

Результат: несущая способность обеспечена.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Предельный изгибающий момент $M_{ult,sh}$ при действии полной нагрузки ⁽¹⁾	кН·м	$\approx 82,8^{(3)}$	$81,1^{(2)} / -2,1 \%$	$81,9 / -1,1 \%$
Несущая способность	–	обеспечена	не обеспечена	не обеспечена

1. При проведении расчетов изгибаемых элементов необходимо анализировать жесткостные характеристики нагруженных сечений во избежание чрезмерного роста прогибов (особенно для слабоармированных элементов).

2. Криволинейная диаграмма бетона принята с учетом влияния градиентов деформаций.

3. Предельный изгибающий момент в исходной задаче определен приближенно по отношению предельного изгибающего момента к действующему в основной плоскости симметрии прогона кровли.

Задача 1.5: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		= произвольное
Габарит сечения по оси Y	Y	= 315 мм
Габарит сечения по оси Z	Z	= 443 мм

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		= В25
Диаграмма состояния бетона		= трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	= 14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	= 1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	= 1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	= 0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	= 30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		= А400
Диаграмма состояния арматуры		= двухлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	= 340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	= 340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	= 1.029
Модуль упругости арматуры	Es	= 200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (3 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
21.8	36.4	18.0	109.1	58.2	18.0	10.9	80.0	18.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	= 0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	= 81.90 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	= 0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	= 0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	= 81.90 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	= 0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	= 0.001 %
Общее количество итераций	i	= 581

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	= 0.000000
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	= 0.014602 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	= -0.011994 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	= 498.2 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	= 244.2 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	437497 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	6493 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	1310 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	-1076 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	27.59 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	275.17 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	8.76 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	44.67 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.004217
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.003456
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-10.94 МПа

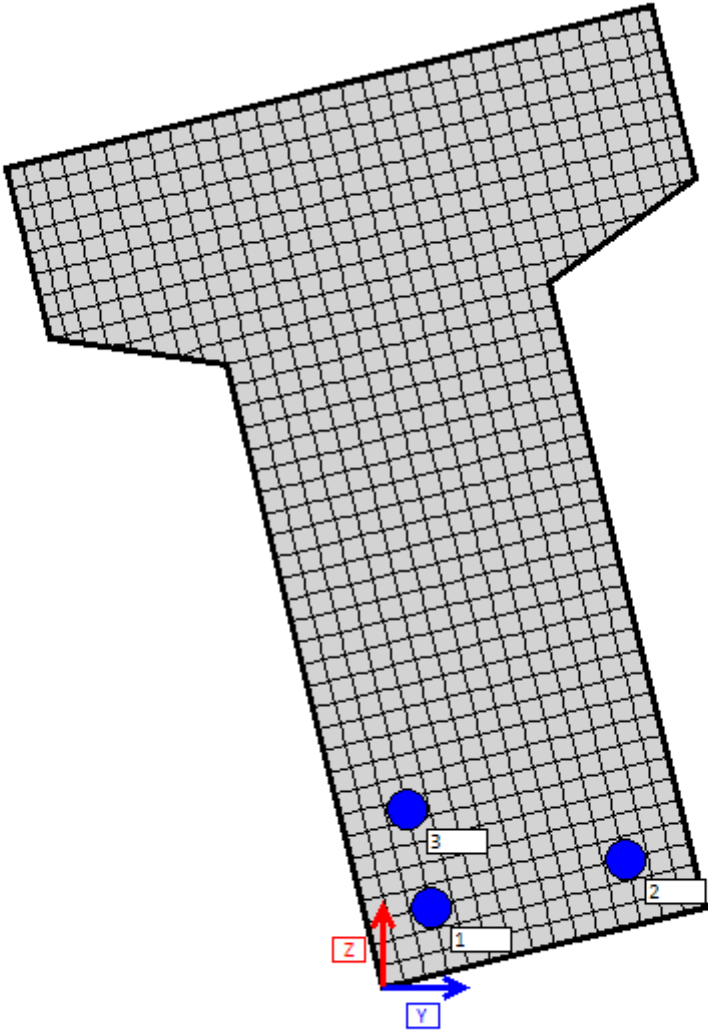
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.003556
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	0.002191
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	350.00 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	350.00 МПа

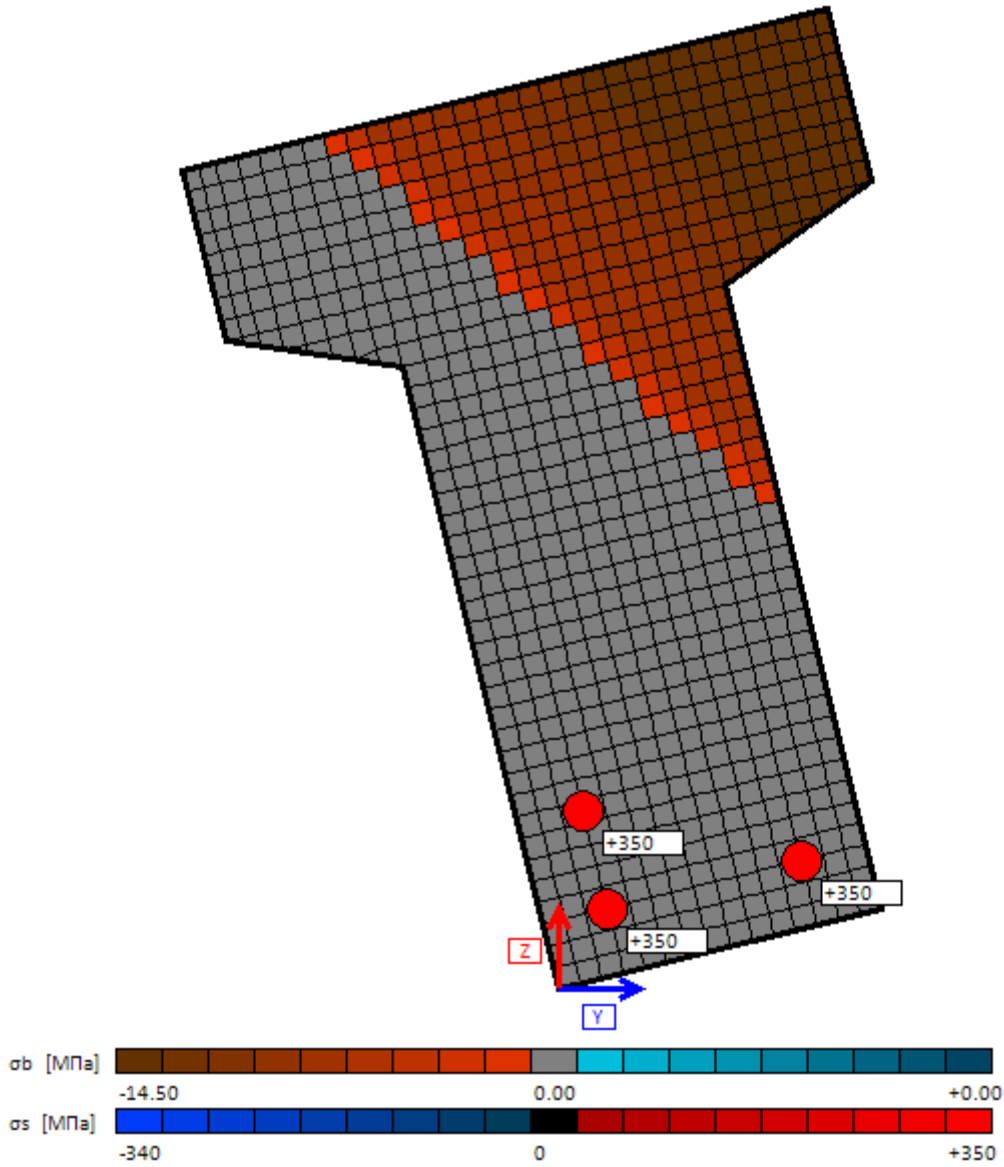
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.987
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	2.032
Остаточные деформации в ненапрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.5: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
2. Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	произвольное
Габарит сечения по оси Y	Y	=	315 мм
Габарит сечения по оси Z	Z	=	443 мм

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	0.926
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R_{bc}	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R_{bt}	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R_s	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R_{sc}	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	E_s	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (3 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
21.8	36.4	18.0	109.1	58.2	18.0	10.9	80.0	18.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	81.10 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	81.10 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.001 %
Общее количество итераций	i	=	444

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.015174 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	-0.011629 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	504.2 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	238.2 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	402294 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	6028 кН·м ²

Изгибная жесткость вокруг оси Z	Dzz	=	1163 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	Dyz	=	-892 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Yc	=	27.38 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Zc	=	280.23 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔYc	=	8.55 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZc	=	49.73 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b,max}	=	0.004436
Минимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b,min}	=	-0.003441
Максимальное напряжение в бетоне	σ _{b,max}	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	σ _{b,min}	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	σ _{b,m}	=	-11.01 МПа

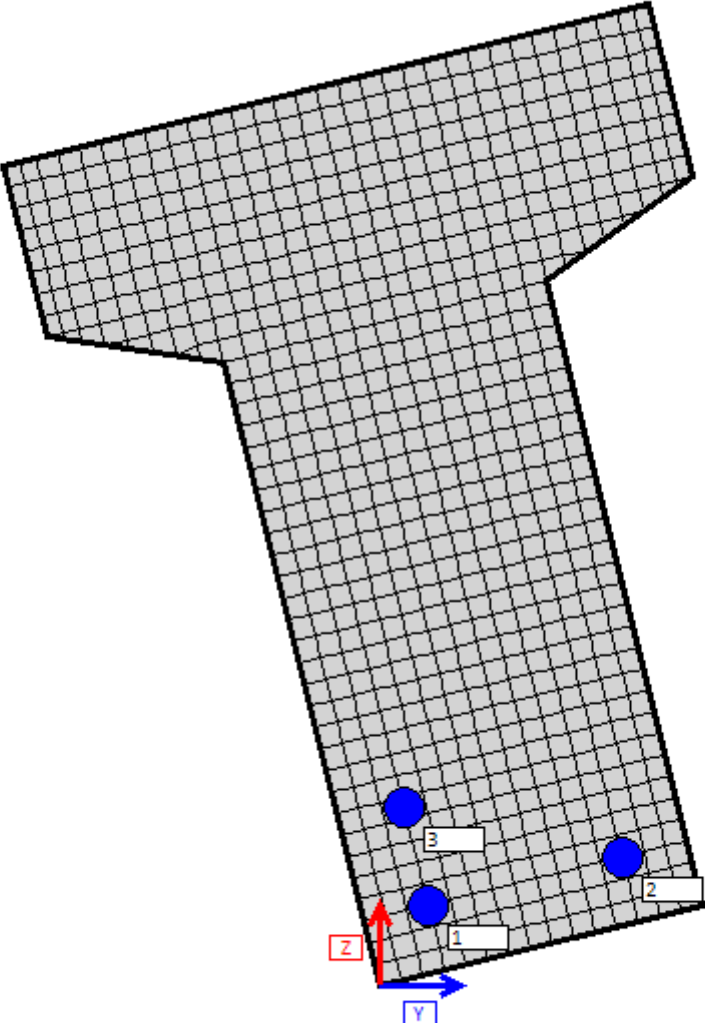
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s,max}	=	0.003765
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s,min}	=	0.002419
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{s,max}	=	350.11 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{s,min}	=	335.19 МПа

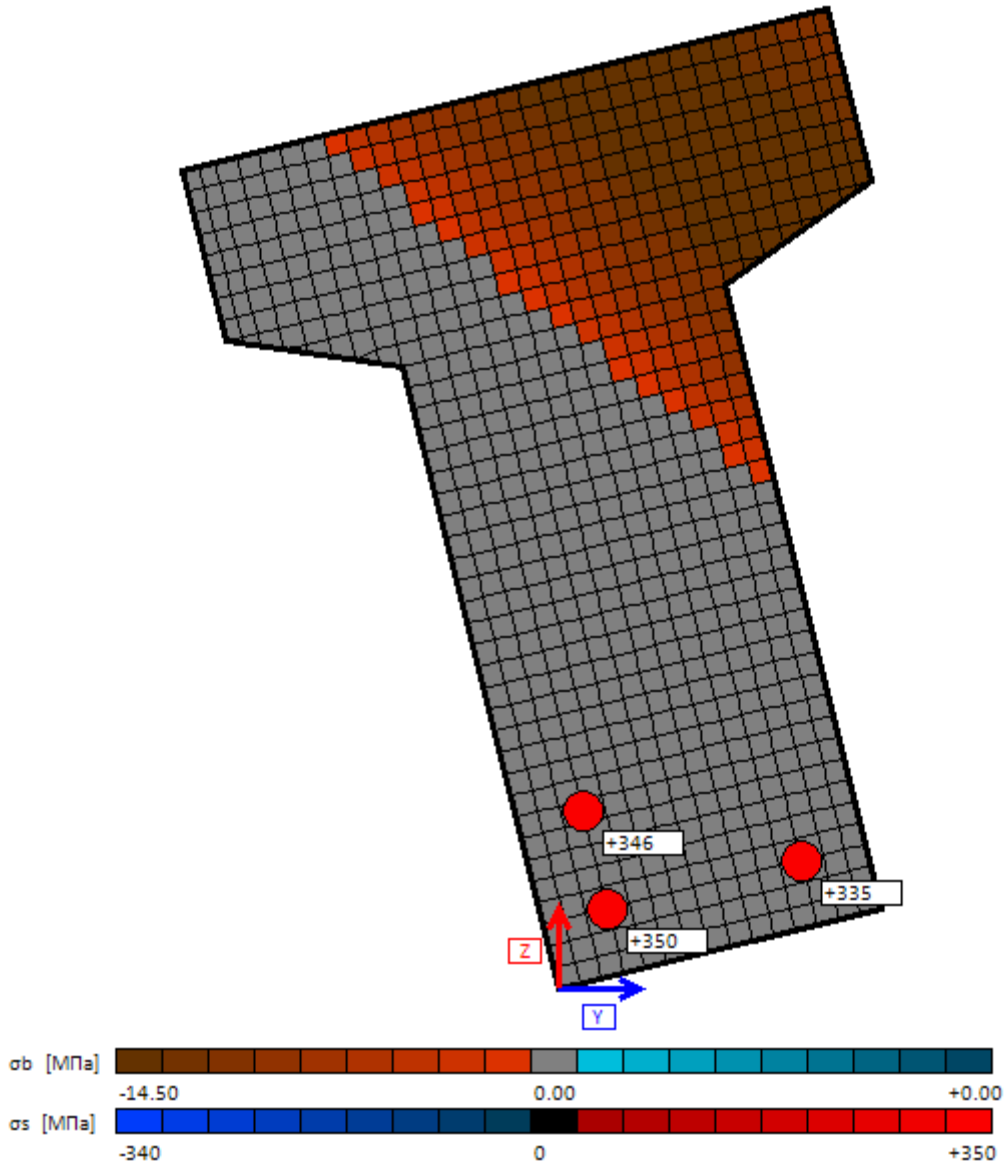
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k _b	=	0.990
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k _s	=	1.004
Остаточные деформации в ненапрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.6 Несущая способность ж.б. элемента при косом внецентренном сжатии

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 32.

Исходные данные: железобетонная колонна прямоугольного сечения с размерами $b = 400$ мм, $h = 500$ мм, $a = a' = 50$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В25;
- ненапрягаемая симметричная арматура $2\varnothing 32$ А400 у каждой грани.

Продольная сжимающая сила $N = 2600$ кН. Изгибающие моменты с учетом влияния продольного изгиба $M_y = 150$ кН·м, $M_z = 100$ кН·м.

Результат: несущая способность обеспечена.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Коэффициент использования материалов сечения при $M_y = 150$ кН·м, $M_z = 100$ кН·м	д. ед.	0,68	0,66	0,80
Отношение действующих изгибающих моментов к предельным	д. ед.	0,79 ⁽²⁾	0,85 ⁽¹⁾	0,87 ⁽¹⁾
Несущая способность	–	обеспечена	обеспечена	обеспечена

1. Предельные пропорциональные изгибающие моменты при косом внецентренном сжатии с фиксированной продольной силой $N = 2600$ кН для криволинейных диаграмм деформирования – $M_{ult,y} = 177$ кН·м, $M_{ult,z} = 118$ кН·м, для кусочно-линейных – $M_{ult,y} = 172$ кН·м, $M_{ult,z} = 115$ кН·м. Данный пример демонстрирует условность коэффициентов использования материалов сечений при анализе результатов расчетов, а также показывает нелинейный рост данных коэффициентов.

2. Расчет разработчиков (предельные пропорциональные изгибающие моменты при косом внецентренном сжатии с фиксированной продольной силой $N = 2600$ кН – $M_{ult,y} = 190$ кН·м, $M_{ult,z} = 127$ кН·м).

Задача 1.6: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	400 мм
Высота сечения	h	=	500 мм

ПАРАМЕТРЫ

Ограничение сжимающих напряжений в арматуре (Rsc) = нет

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	двухлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (4 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	50.0	32.0	350.0	50.0	32.0	50.0	450.0	32.0
350.0	450.0	32.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-2600.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	150.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	100.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	-2600.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	150.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	100.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.001 %
Общее количество итераций	i	=	33

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	-0.000883
Кривизна вокруг оси Y	1/ry	=	0.003740 1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/rz	=	0.004210 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	At	=	167.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	Ac	=	1833.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	2943791 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	65949 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	40644 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	7076 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	217.18 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	224.29 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	17.18 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	-25.71 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.000686
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.002789
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-11.24 МПа

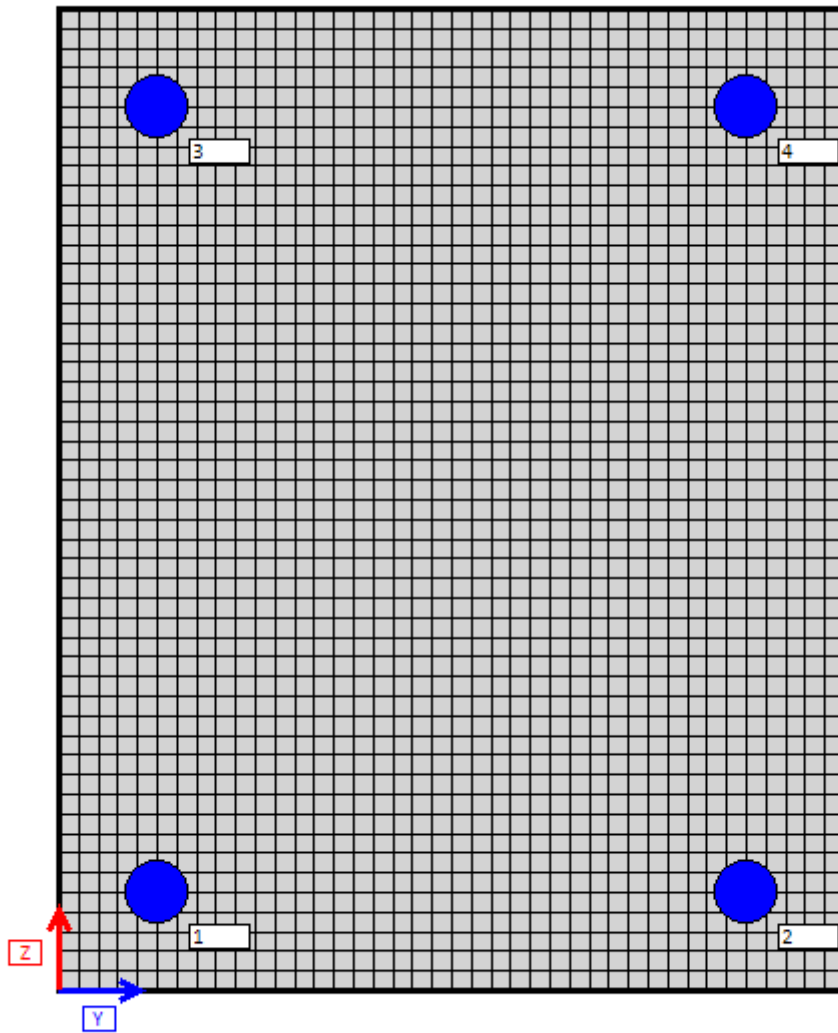
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.000328
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	-0.002431
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	65.56 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	-350.00 МПа

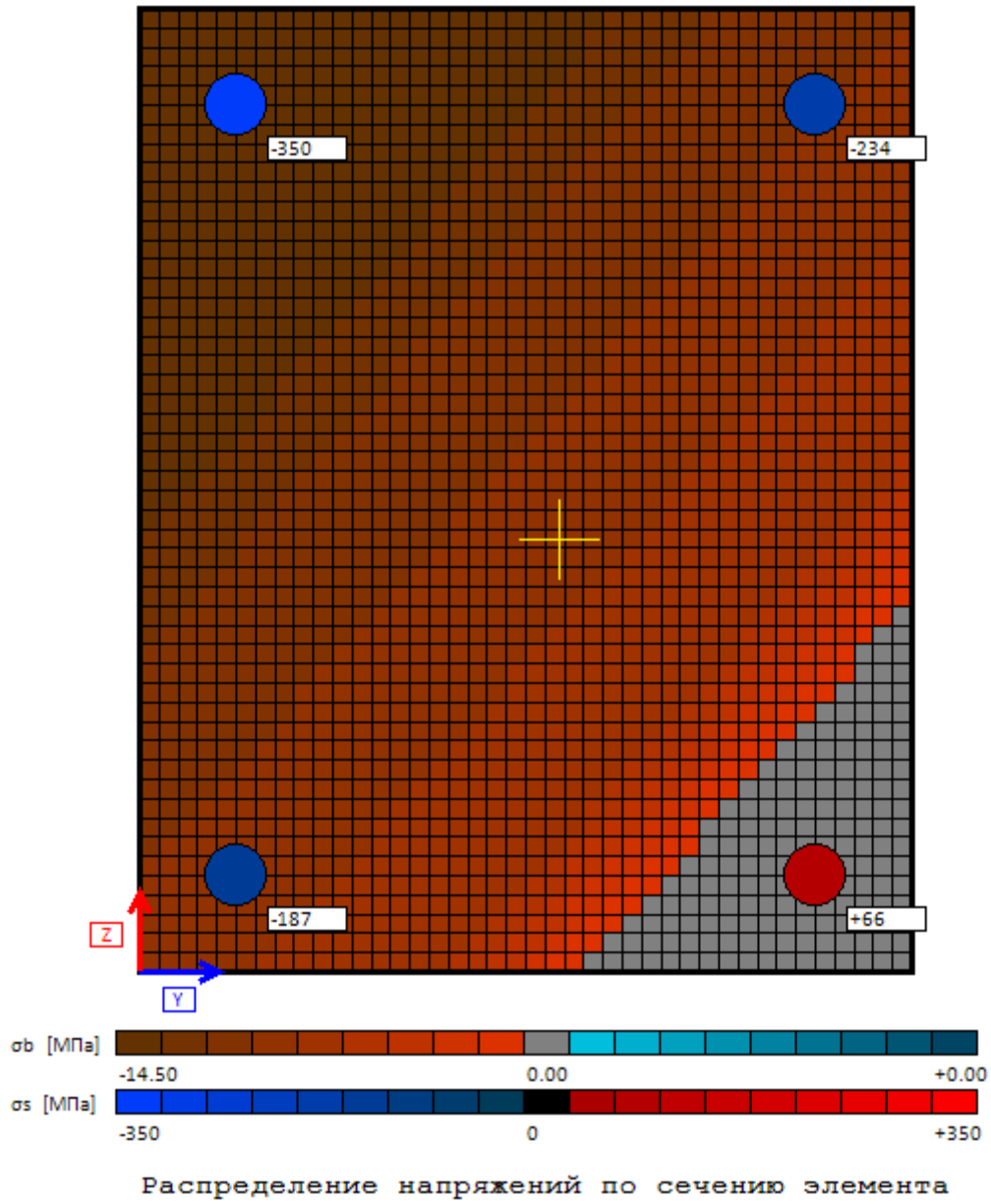
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.797
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	0.187

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Задача 1.6: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
2. Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	400 мм
Высота сечения	h	=	500 мм

ПАРАМЕТРЫ

Ограничение сжимающих напряжений в арматуре (Rsc) = нет

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.000
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	=	340 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	=	340 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.029
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (4 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	50.0	32.0	350.0	50.0	32.0	50.0	450.0	32.0
350.0	450.0	32.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	-2600.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	150.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	100.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	-2600.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	My	=	150.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mz	=	100.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.001 %
Общее количество итераций	i	=	38

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	-0.000792
Кривизна вокруг оси Y	1/ry	=	0.003069 1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/rz	=	0.003414 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	At	=	153.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	Ac	=	1847.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	3281089	кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	73279	кН · м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	45479	кН · м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	8533	кН · м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	211.19	мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	232.41	мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	11.19	мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	-17.59	мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.000533	
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.002302	
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00	МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-14.50	МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-11.47	МПа

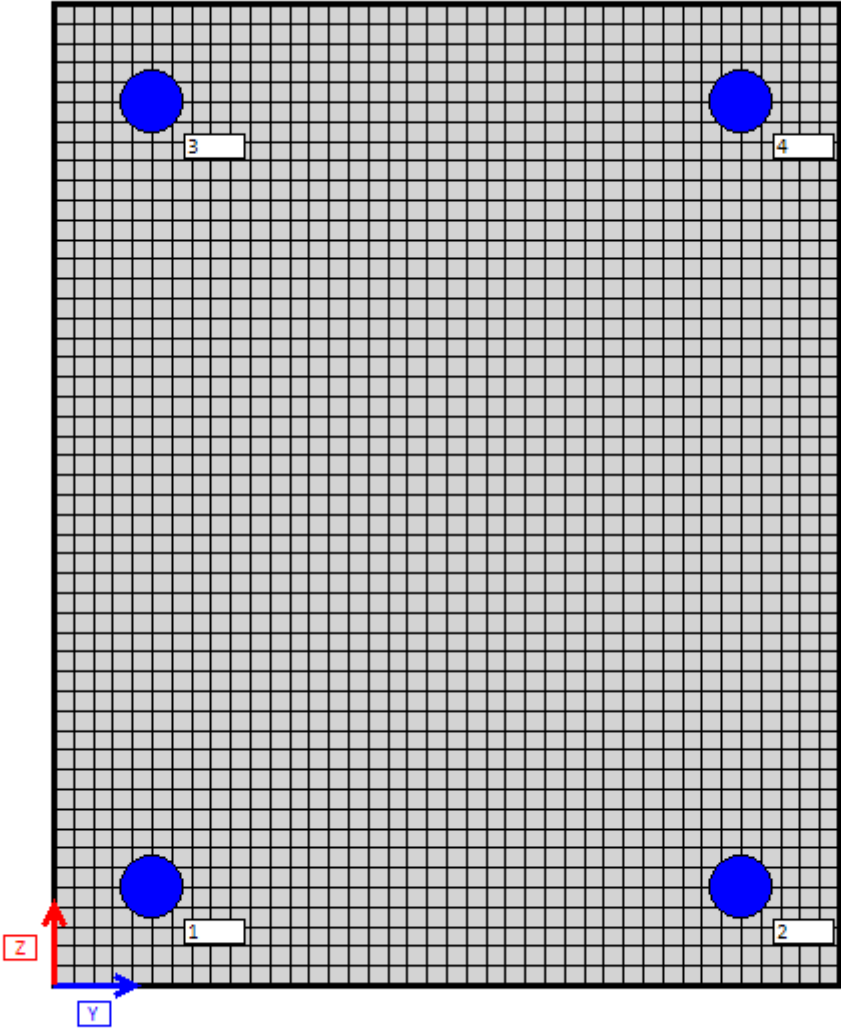
ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.000241	
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	-0.002011	
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	48.26	МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	-327.25	МПа

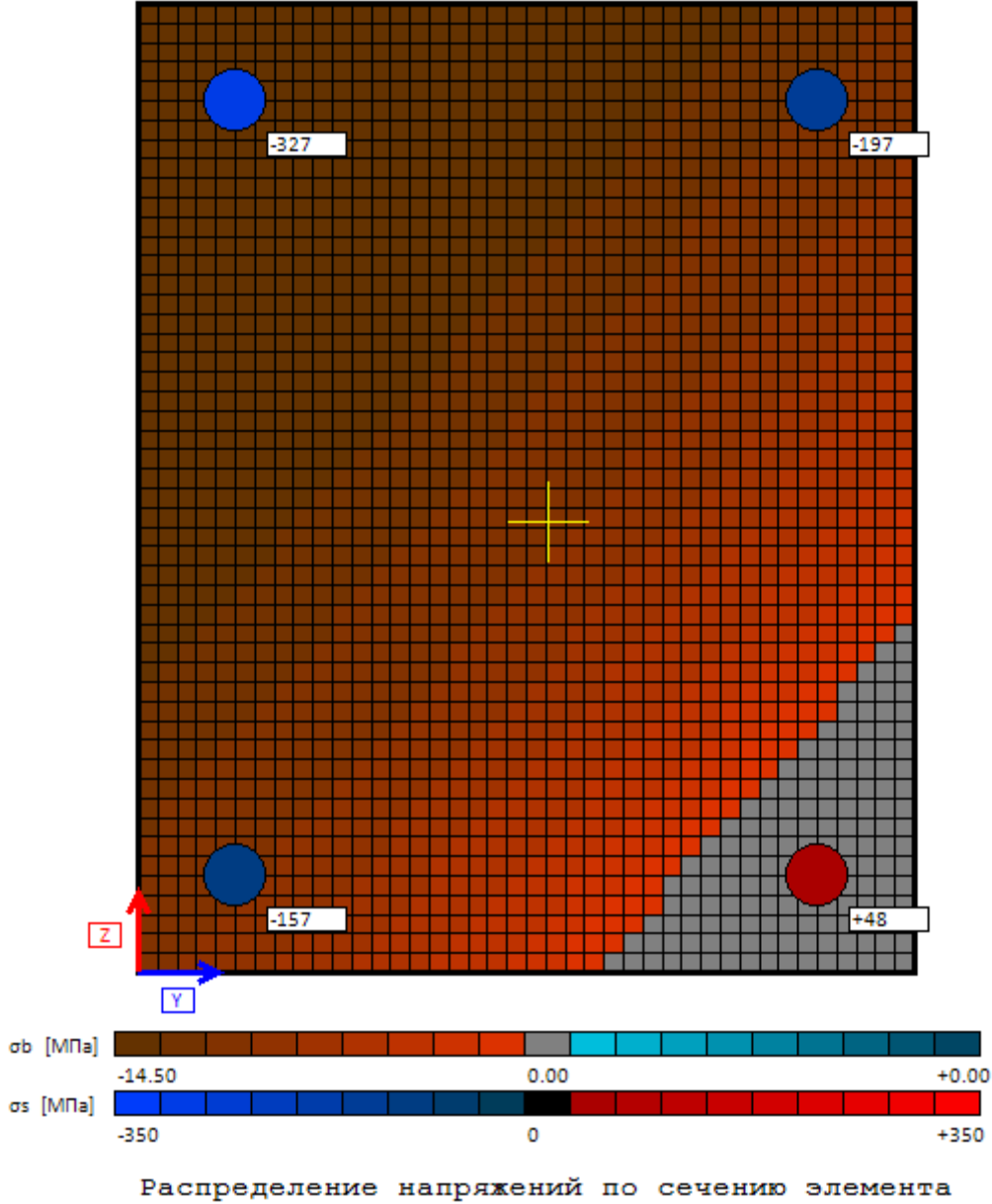
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.658
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	0.064

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Задача 1.7 Трещиностойкость изгибаемого ж.б. элемента

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 42.

Исходные данные: железобетонный элемент прямоугольного сечения с размерами $b = 1150$ мм, $h = 300$ мм, $a = 42$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В15;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне $6\phi 14$ А400.

Полный изгибающий момент $M_{sh} = 60$ кН·м, в том числе от действия постоянных и длительных нагрузок – $M_l = 50$ кН·м.

Результат: трещиностойкость обеспечена.

Сравнение результатов расчета ⁽¹⁾

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Коэффициент влияния неравномерного распределения относительных деформаций арматуры на участке между трещинами $\psi_{s,l}$	д. ед.	0,605	0,517 / -14,5 %	0,440 / -27,3 %
Напряжение в продольной растянутой арматуре при действии постоянных и длительных нагрузок $\sigma_{s,l}$	МПа	235,9	225,4 / -4,5 %	220,7 / -6,4 %
Ширина раскрытия трещин при продолжительном действии нагрузки $a_{cr,c,l}^{(2)}$	мм	0,200	0,163 / -18,5 %	0,136 / -32,0 %
Трещиностойкость	–	обеспечена	обеспечена	обеспечена

1. Проверяется только продолжительное раскрытие трещин как самое неблагоприятное.

2. Отклонения ширины раскрытия трещин в NDM в основном обусловлены уточненным определением коэффициента влияния неравномерного распределения относительных деформаций арматуры между трещинами $\psi_{s,l}$.

Задача 1.7: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	1150 мм
Высота сечения	h	=	300 мм

ПАРАМЕТРЫ

Огранич. раскрыт. трещин ненапрягаемой арматуры:			
- непродолжительное	as, crc, ult, sh	=	0.400 мм
- продолжительное	as, crc, ult, l	=	0.300 мм
Расчетный диаметр ненапрягаемой арматуры	ds	=	14.0 мм
Учет коэффициента ψ_s		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc, ser	=	11.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt, ser	=	1.10 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	24000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	двухлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs, ser	=	390 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.026
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (6 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
75.0	42.0	14.0	275.0	42.0	14.0	475.0	42.0	14.0
675.0	42.0	14.0	875.0	42.0	14.0	1075.0	42.0	14.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольные силы:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	60.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	50.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м

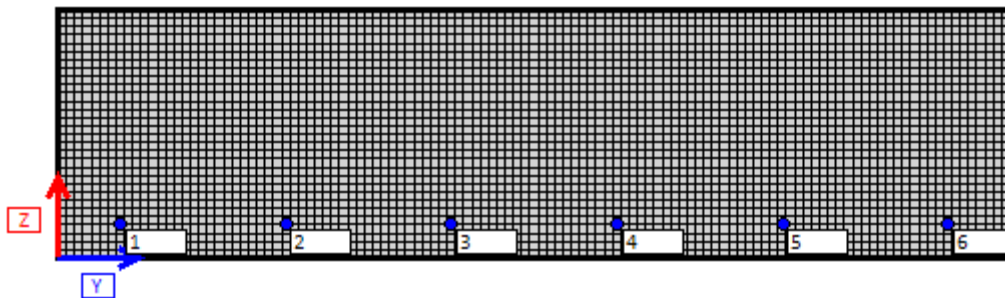
ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольные усилия:			
- при действии кратковременных нагрузок	N_{sh}	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	N_l	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{y, sh}$	=	60.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{y, l}$	=	50.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{z, sh}$	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{z, l}$	=	0.00 кН·м
Итерационная точность:			
- при действии кратковременных нагрузок	δ_{sh}	=	0.029 %
- при действии длительных нагрузок	δ_l	=	0.061 %
Общее количество итераций	i	=	657

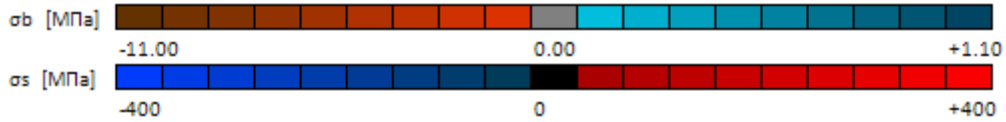
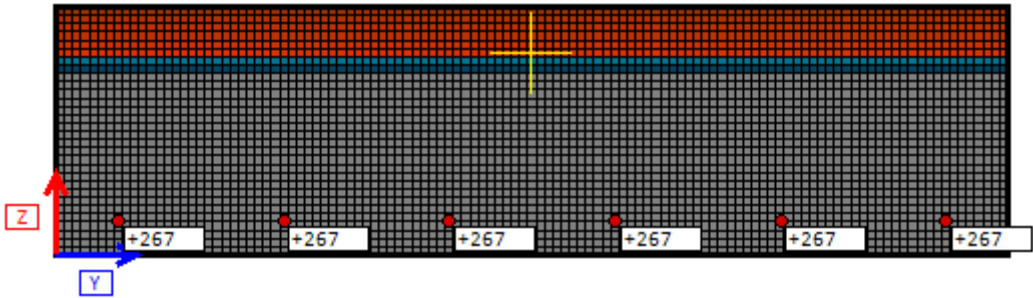
РЕШЕНИЕ

Статус решения	=	найдено
Трещины	=	образуются
Напряжения в ненапрягаемой растянутой арматуре:		
- сразу после образования трещин	$\sigma_{s, crc}$	= 154.44 МПа
- при действии кратковременных нагрузок	$\sigma_{s, sh}$	= 267.23 МПа
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$\sigma_{s, l}$	= 220.68 МПа
Ширина раскр. трещин в ненапрягаемой арматуре:		
- непродолжительная	$a_{s, crc, sh}$	= 0.183 мм
- продолжительная	$a_{s, crc, l}$	= 0.136 мм
Коэффициент использ. сеч. по трещиностойкости	k_{crc}	= 0.456

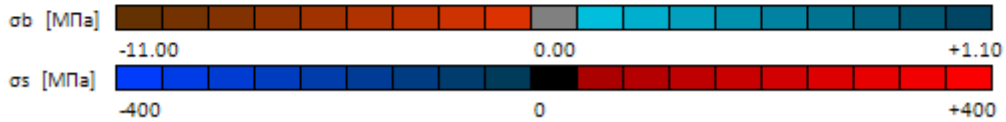
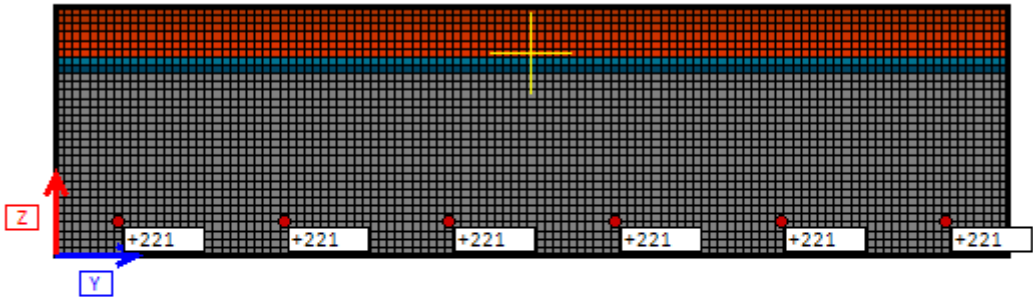
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Напряжения от кратковременных нагрузок



Напряжения от постоянных и длительных нагрузок

Задача 1.7: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
2. Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	1150 мм
Высота сечения	h	=	300 мм

ПАРАМЕТРЫ

Огранич. раскр. трещин ненапрягаемой арматуры:			
- непродолжительное	as, crc, ult, sh	=	0.400 мм
- продолжительное	as, crc, ult, l	=	0.300 мм
Расчетный диаметр ненапрягаемой арматуры	ds	=	14.0 мм
Учет коэффициента ψ_s		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.007
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc, ser	=	11.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt, ser	=	1.10 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	24000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs, ser	=	390 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.026
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (6 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
75.0	42.0	14.0	275.0	42.0	14.0	475.0	42.0	14.0
675.0	42.0	14.0	875.0	42.0	14.0	1075.0	42.0	14.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольные силы:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	60.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	50.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м

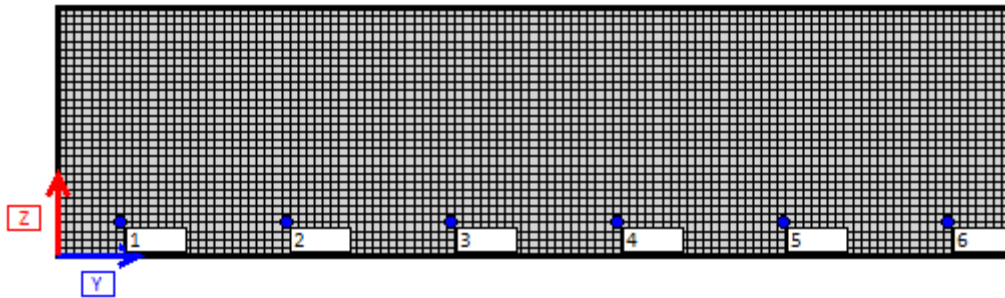
ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольные усилия:			
- при действии кратковременных нагрузок	N_{sh}	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	N_l	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{y, sh}$	=	60.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{y, l}$	=	50.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{z, sh}$	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{z, l}$	=	0.00 кН·м
Итерационная точность:			
- при действии кратковременных нагрузок	δ_{sh}	=	0.087 %
- при действии длительных нагрузок	δ_l	=	0.043 %
Общее количество итераций	i	=	479

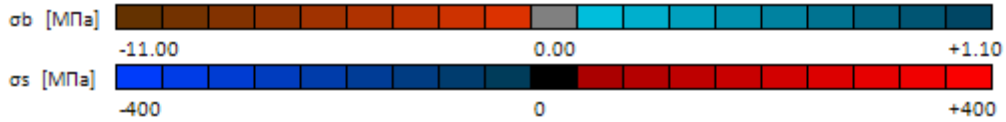
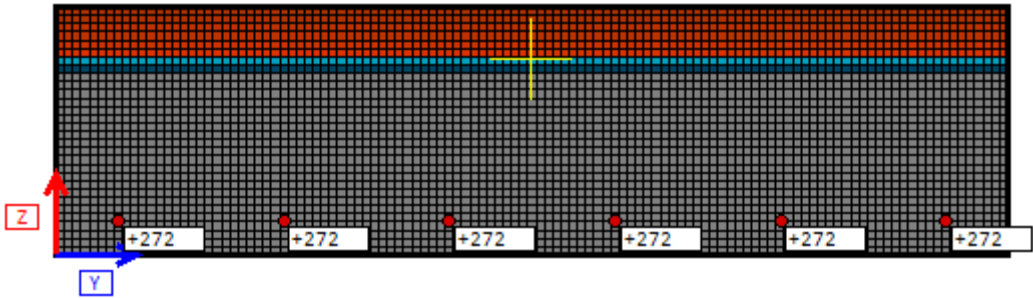
РЕШЕНИЕ

Статус решения	=	найдено
Трещины	=	образуются
Напряжения в ненапрягаемой растянутой арматуре:		
- сразу после образования трещин	$\sigma_{s, crc}$	= 136.19 МПа
- при действии кратковременных нагрузок	$\sigma_{s, sh}$	= 272.16 МПа
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$\sigma_{s, l}$	= 225.38 МПа
Ширина раскр. трещин в ненапрягаемой арматуре:		
- непродолжительная	$a_{s, crc, sh}$	= 0.210 мм
- продолжительная	$a_{s, crc, l}$	= 0.163 мм
Коэффициент использ. сеч. по трещиностойкости	k_{crc}	= 0.543

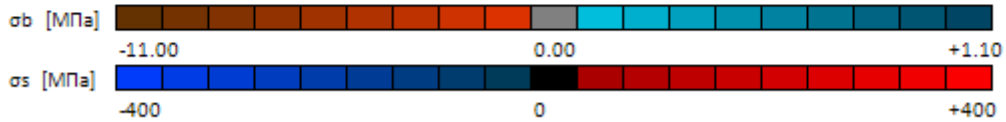
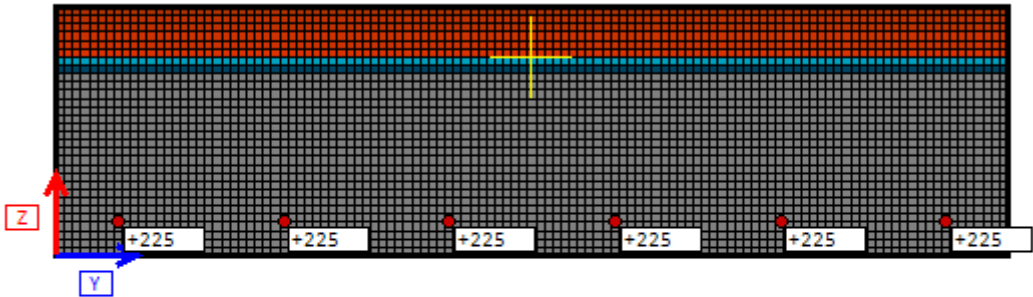
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Напряжения от кратковременных нагрузок



Напряжения от постоянных и длительных нагрузок

Задача 1.8 Трещиностойкость внецентренно сжатого ж.б. элемента

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 43.

Исходные данные: железобетонная колонна прямоугольного сечения с размерами $b = 400$ мм, $h = 500$ мм, $a = 50$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В15;
- ненапрягаемая симметричная арматура $2\emptyset 28$ А400 у каждой грани.

Усилия от полных нагрузок – $N_{sh} = 500$ кН, $M_{sh} = 240$ кН·м, в том числе от действия постоянных и длительных нагрузок – $N_l = 500$ кН, $M_l = 150$ кН·м.

Результат: трещиностойкость обеспечена.

Сравнение результатов расчета ⁽¹⁾

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Коэффициент влияния неравномерного распределения относительных деформаций арматуры на участке между трещинами $\psi_{s,sh}$	д. ед.	0,940	0,942 / +0,2 %	0,865 / -8,0 %
Напряжение в продольной растянутой арматуре при действии постоянных и длительных нагрузок $\sigma_{s,l}$	МПа	144,3	142,3 / -1,4 %	144,8 / +0,3 %
Напряжение в продольной растянутой арматуре при действии полных нагрузок $\sigma_{s,sh}$	МПа	331,2	328,3 / -0,9 %	335,4 / +1,3 %
Ширина раскрытия трещин при непродолжительном действии нагрузки $a_{cr,sh}$	мм	0,360	0,359 / -0,3 %	0,330 / -8,3 %
Трещиностойкость	–	обеспечена	обеспечена	обеспечена

1. Проверяется только непродолжительное раскрытие трещин как самое неблагоприятное.

Задача 1.8: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	400 мм
Высота сечения	h	=	500 мм

ПАРАМЕТРЫ

Огранич. раскрыт. трещин ненапрягаемой арматуры:			
- непродолжительное	as, crc, ult, sh	=	0.400 мм
- продолжительное	as, crc, ult, l	=	0.300 мм
Расчетный диаметр ненапрягаемой арматуры	ds	=	28.0 мм
Учет коэффициента ψ_s		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc, ser	=	11.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt, ser	=	1.10 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	24000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	двухлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs, ser	=	390 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.026
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (4 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	50.0	28.0	350.0	50.0	28.0	50.0	450.0	28.0
350.0	450.0	28.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольные силы:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	-500.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	-500.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	240.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	150.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

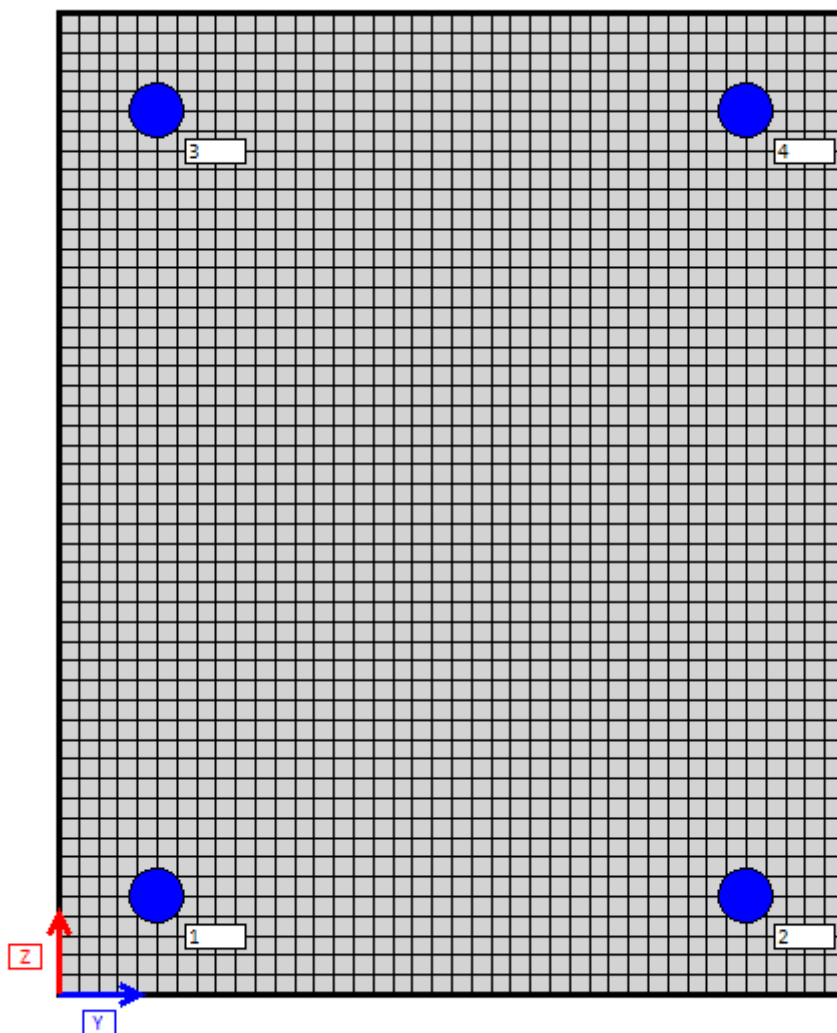
Продольные усилия:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	-499.8 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	-499.7 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	239.97 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	149.96 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			

- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м
Итерационная точность:			
- при действии кратковременных нагрузок	δsh	=	0.050 %
- при действии длительных нагрузок	δl	=	0.064 %
Общее количество итераций	i	=	129

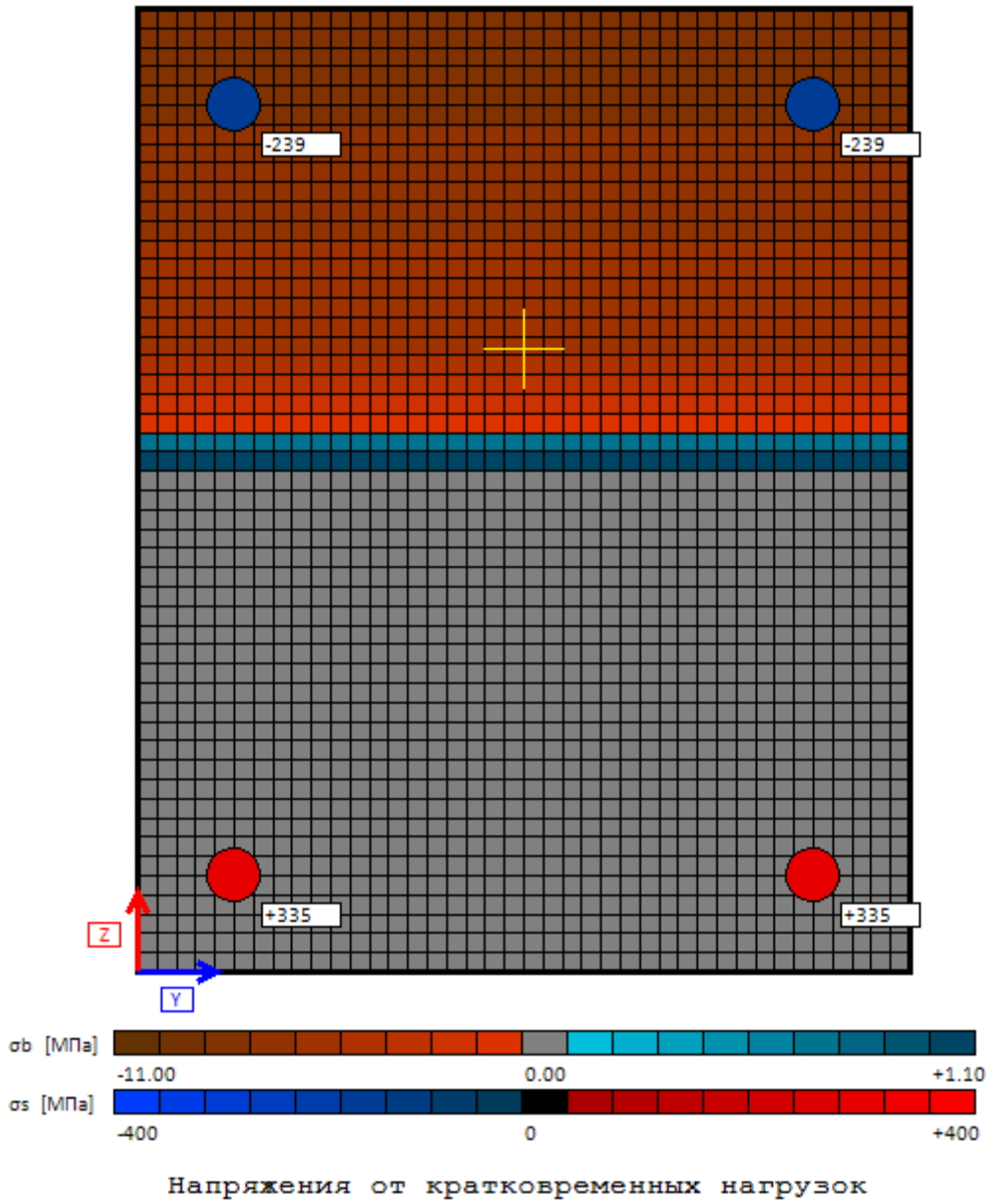
РЕШЕНИЕ

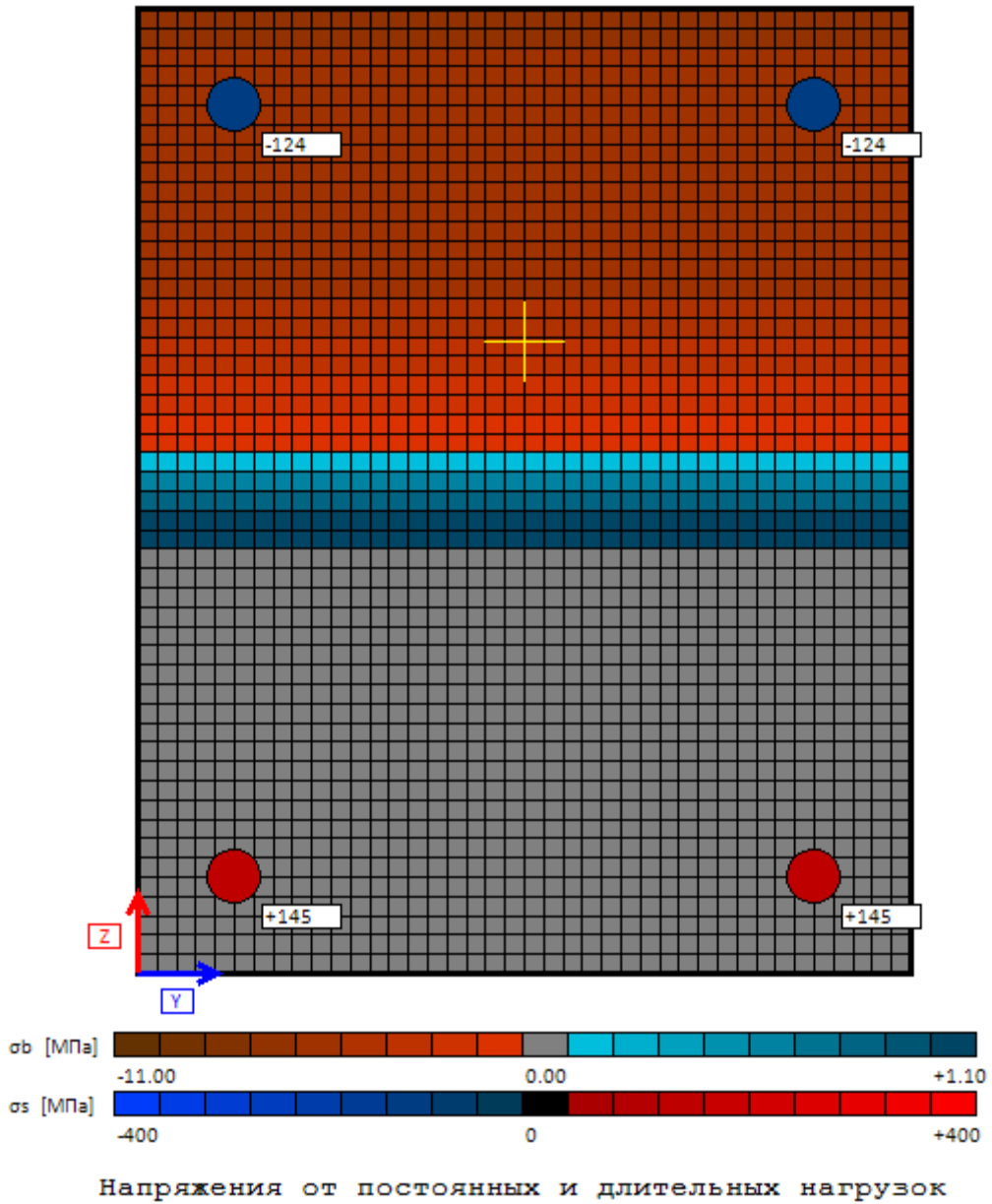
Статус решения	=	найдено	
Трещины	=	образуются	
Напряжения в ненапрягаемой растянутой арматуре:			
- сразу после образования трещин	$\sigma s, crc$	=	56.66 МПа
- при действии кратковременных нагрузок	$\sigma s, sh$	=	335.35 МПа
- при действии постоянных и длительных нагр.	$\sigma s, l$	=	144.82 МПа
Ширина раскр. трещин в ненапрягаемой арматуре:			
- непродолжительная	as, crc, sh	=	0.330 мм
- продолжительная	as, crc, l	=	0.139 мм
Коэффициент использ. сеч. по трещиностойкости	$kcrc$	=	0.825

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента





Задача 1.8: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
- Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	400 мм
Высота сечения	h	=	500 мм

ПАРАМЕТРЫ

Огранич. раскр. трещин ненапрягаемой арматуры:			
- непродолжительное	as, crc, ult, sh	=	0.400 мм
- продолжительное	as, crc, ult, l	=	0.300 мм
Расчетный диаметр ненапрягаемой арматуры	ds	=	28.0 мм
Учет коэффициента ψ_s		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	0.907
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc, ser	=	11.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt, ser	=	1.10 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	24000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs, ser	=	390 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.026
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (4 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	50.0	28.0	350.0	50.0	28.0	50.0	450.0	28.0
350.0	450.0	28.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольные силы:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	-500.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	-500.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	240.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	150.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

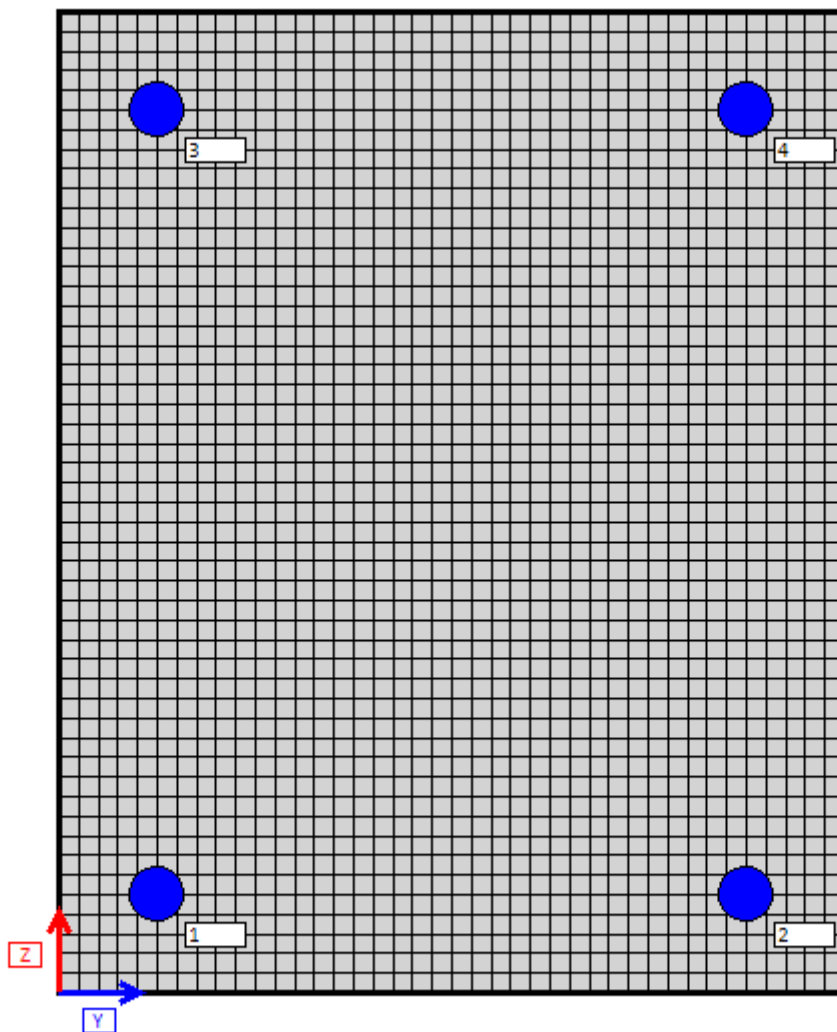
Продольные усилия:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	-499.8 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	-500.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			

- при действии кратковременных нагрузок	$M_{y, sh}$	=	239.96 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{y, l}$	=	150.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{z, sh}$	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{z, l}$	=	0.00 кН·м
Итерационная точность:			
- при действии кратковременных нагрузок	δ_{sh}	=	0.063 %
- при действии длительных нагрузок	δ_l	=	0.035 %
Общее количество итераций	i	=	123

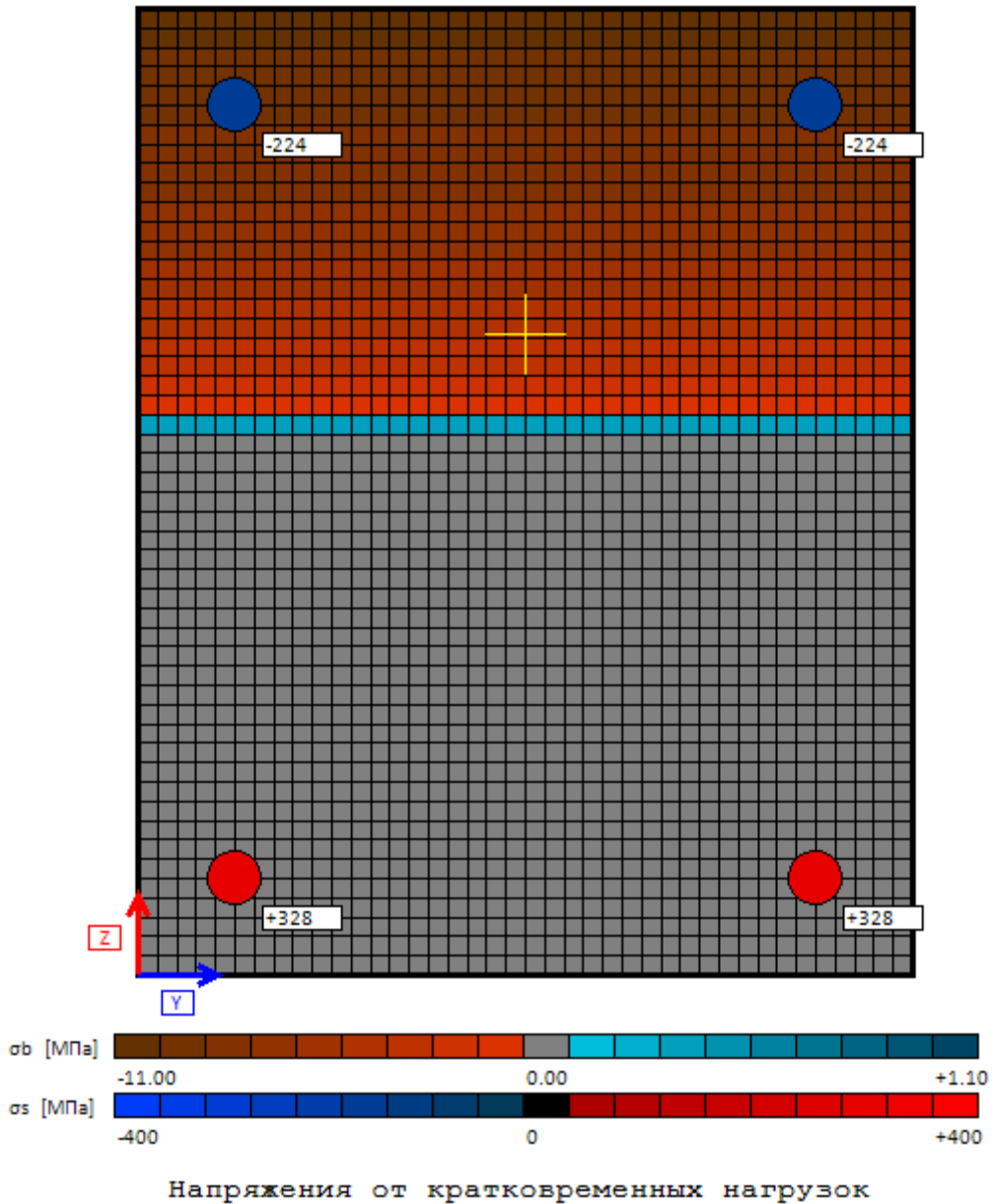
РЕШЕНИЕ

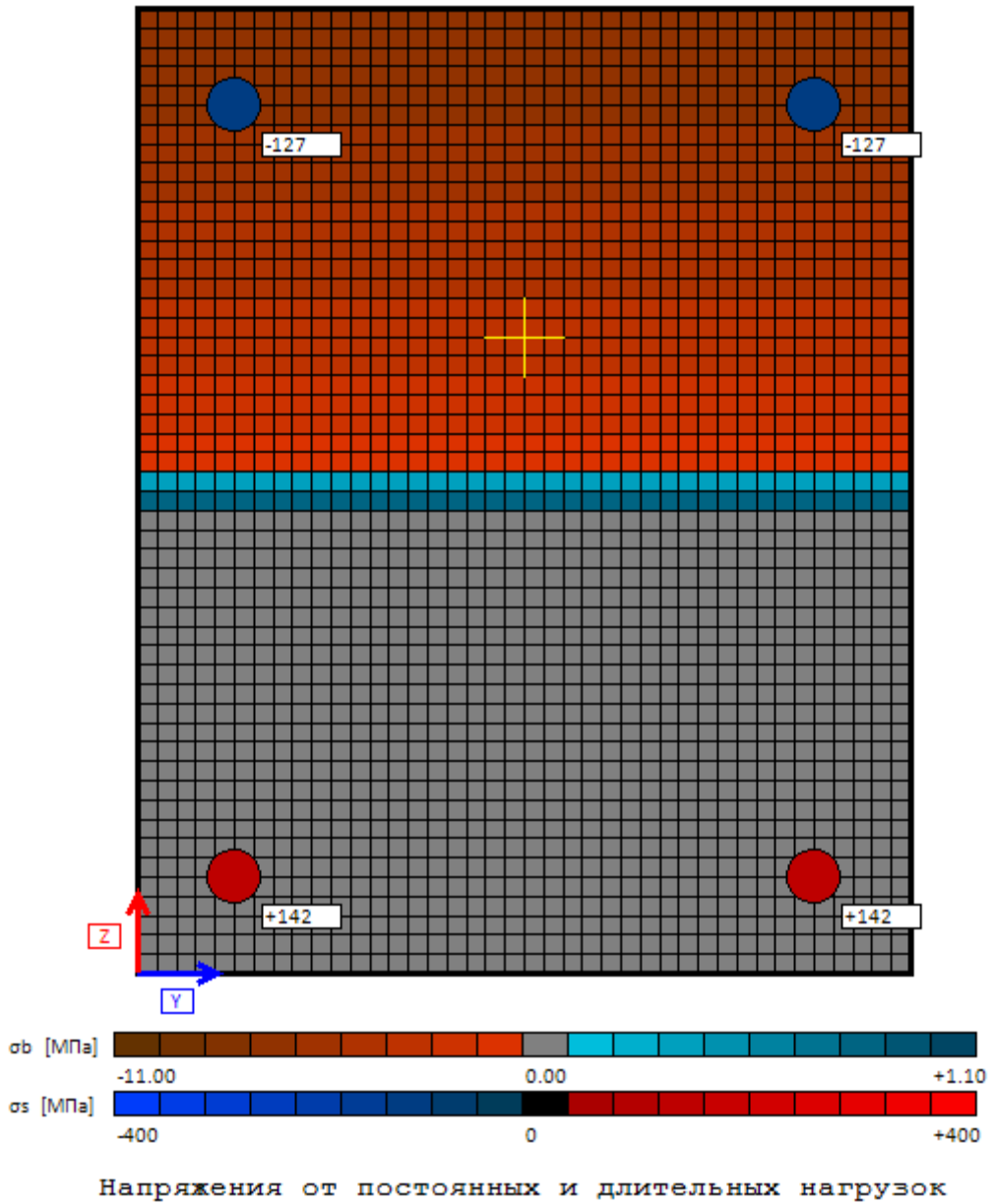
Статус решения	=	найдено
Трещины	=	образуются
Напряжения в ненапрягаемой растянутой арматуре:		
- сразу после образования трещин	$\sigma_{s, crc}$	= 23.90 МПа
- при действии кратковременных нагрузок	$\sigma_{s, sh}$	= 328.33 МПа
- при действии постоянных и длительных нагр.	$\sigma_{s, l}$	= 142.27 МПа
Ширина раскр. трещин в ненапрягаемой арматуре:		
- непродолжительная	$a_{s, crc, sh}$	= 0.358 мм
- продолжительная	$a_{s, crc, l}$	= 0.172 мм
Коэффициент использ. сеч. по трещиностойкости	k_{crc}	= 0.896

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента





Задача 1.9 Кривизна изгибаемого ж.б. элемента

Источник: Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [3].

Пример расчета – № 44.

Исходные данные: железобетонный элемент прямоугольного сечения с размерами $b = 1000$ мм, $h = 200$ мм, $a = 27$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В15;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне $5\emptyset 14$ А400.

Изгибающий момент при действии постоянных и длительных нагрузок $M_l = 25,5$ кН·м.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Кривизна при действии постоянных и длительных нагрузок ($1/r$)	1/м	0,00999	0,00780 ⁽¹⁾ / -21,9 %	0,00945 / -5,7 %

1. Отклонение при использовании криволинейных диаграмм деформирования материалов обусловлено особым учетом ползучести бетона в соответствии с методическим пособием «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии», разработанным ФАУ «ФЦС» [2]. Относительная влажность воздуха окружающей среды принята 73 % (г. Москва).

Задача 1.9: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	1000 мм
Высота сечения	h	=	200 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
Характеристика ползучести бетона	φ	=	3.400
Работа бетона между трещинами (ψ_s)		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	$R_{bc,ser}$	=	11.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	$R_{bt,ser}$	=	1.10 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	=	24000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	двухлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{s,ser}$	=	390 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.026
Модуль упругости арматуры	E_s	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (5 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
100.0	27.0	14.0	300.0	27.0	14.0	500.0	27.0	14.0
700.0	27.0	14.0	900.0	27.0	14.0			

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	25.50 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	25.50 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.000 %
Общее количество итераций	i	=	459

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.009452 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	1200.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	800.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	641569	кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	2698	кН · м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	52776	кН · м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0	кН · м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	500.00	мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	117.46	мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00	мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	26.27	мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

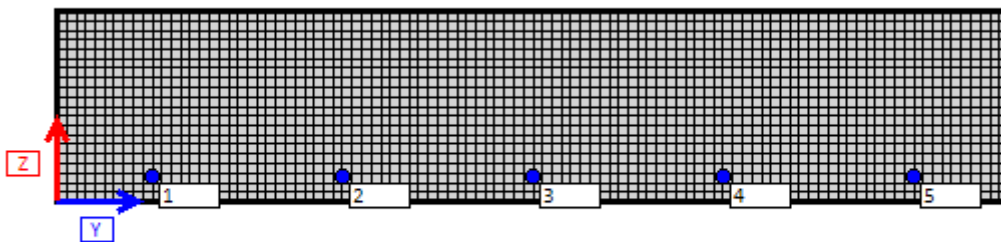
Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.001063	
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.000733	
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00	МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-4.00	МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-2.19	МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

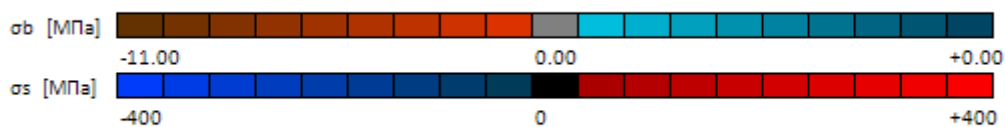
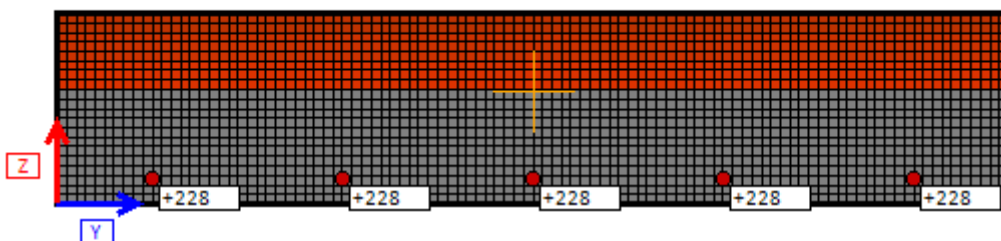
Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.000855	
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	0.000855	
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	227.94	МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	227.94	МПа

РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.153
Коэффициент использования ненапрягаемой арматуры	k_s	=	0.034
Коэффициент упругой работы ненапрягаемой арматуры	$k_{s,el}$	=	0.570



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 1.9: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

[1] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
 [2] Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций
 при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	1000 мм
Высота сечения	h	=	200 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
Характеристика ползучести бетона по [2]	φ	=	2.280
Работа бетона между трещинами (ψ_s)		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B15
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.085
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	$R_{bc,ser}$	=	11.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	$R_{bt,ser}$	=	1.10 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	=	24000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A400
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{s,ser}$	=	390 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.026
Модуль упругости арматуры	E_s	=	200000 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (5 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
100.0	27.0	14.0	300.0	27.0	14.0	500.0	27.0	14.0
700.0	27.0	14.0	900.0	27.0	14.0			

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	25.50 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	25.50 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.015 %
Общее количество итераций	i	=	646

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε_x	=	0.000000
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.007804 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	1100.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	900.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	847736 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	3268 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	69768 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	500.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	114.19 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	16.19 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

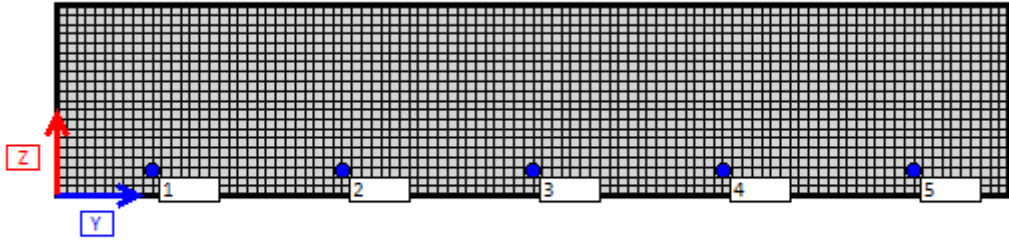
Максимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,max}$	=	0.000852
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\varepsilon_{b,min}$	=	-0.000631
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-3.67 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-1.98 МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

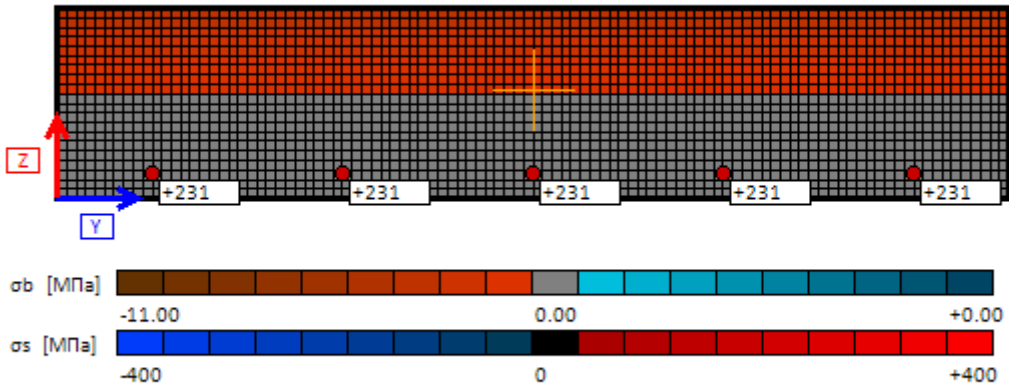
Максимальная относительная деформация в арматуре	$\varepsilon_{s,max}$	=	0.000680
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\varepsilon_{s,min}$	=	0.000680
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	231.32 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	231.32 МПа

РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.143
Коэффициент использования ненапрягаемой арматуры	k_s	=	0.027
Коэффициент упругой работы ненапрягаемой арматуры	$k_{s,e1}$	=	0.578



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

9.3 Предварительно напряженные железобетонные конструкции

Задача 2.1 Несущая способность изгибаемого ж.б. элемента прямоугольного сечения (разрушение по растянутой арматуре)

Источник: Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [4].

Пример расчета – № 2.

Исходные данные: железобетонный элемент прямоугольного сечения с размерами $b = 300$ мм, $h = 700$ мм, $a = 50$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В25;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне $3\emptyset 10$ А600;
- напрягаемая арматура в растянутой зоне $2\emptyset 32$ А600;
- предварительное напряжение с учетом всех потерь $\sigma_{sp} = 440$ МПа.

Полный изгибающий момент $M_{sh} = 570$ кН·м.

Результат: несущая способность не обеспечена.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Предельный изгибающий момент $M_{ult,sh}$ при действии полной нагрузки ⁽¹⁾	кН·м	539,5	547 ⁽²⁾ / +1,4 %	547 / +1,4 %
Несущая способность	–	не обеспечена	не обеспечена	не обеспечена

1. При проведении расчетов изгибаемых элементов необходимо анализировать жесткостные характеристики нагруженных сечений во избежание чрезмерного роста прогибов (особенно для слабоармированных элементов).

2. Криволинейная диаграмма бетона принята с учетом влияния градиентов деформаций.

Задача 2.1: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	700 мм

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R _{bc}	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R _{bt}	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ _{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ _{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E _b	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R _s	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R _{sc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ _s	=	1.000
Модуль упругости арматуры	E _s	=	200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R _{sp}	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R _{spc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ _{sp}	=	1.000
Модуль упругости арматуры	E _{sp}	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ _{sp}	=	440 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (3 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	50.0	10.0	150.0	50.0	10.0	250.0	50.0	10.0

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
100.0	50.0	32.0	200.0	50.0	32.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	547.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N _p	=	-707.7 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _{p, y}	=	-202.26 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _{p, z}	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	547.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.092 %
Общее количество итераций	i	=	62

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε _x	=	-0.000746
Кривизна вокруг оси Y	1/r _y	=	0.012514 1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/r _z	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A _t	=	1260.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A _c	=	840.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D _{xx}	=	949248 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D _{yy}	=	19571 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D _{zz}	=	6861 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D _{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y _c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z _c	=	476.82 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY _c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ _c	=	141.04 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b,max}	=	0.005159
Минимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b,min}	=	-0.003476
Максимальное напряжение в бетоне	σ _{b,max}	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	σ _{b,min}	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	σ _{b,m}	=	-12.38 МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s,max}	=	0.004596
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s,min}	=	0.004596
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{s,max}	=	519.90 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{s,min}	=	519.90 МПа

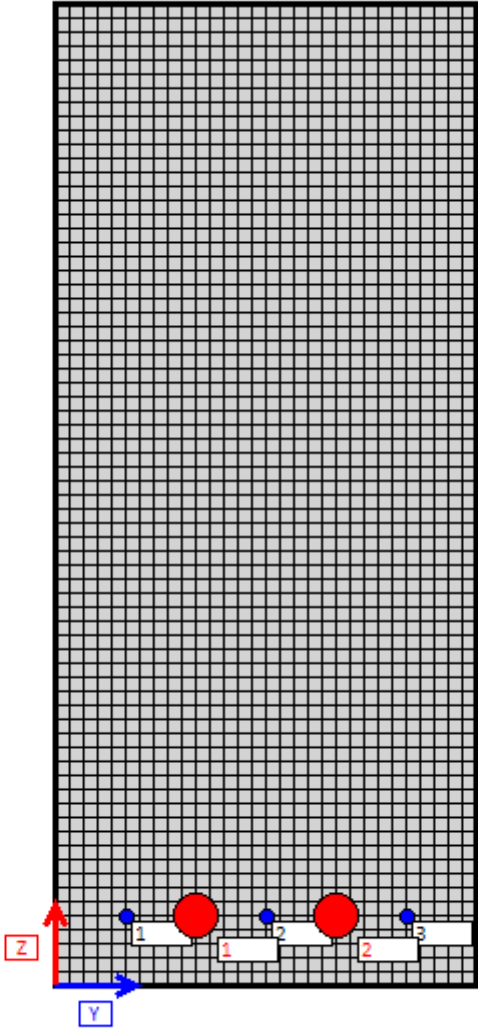
ПАРАМЕТРЫ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{sp,max}	=	0.004596
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{sp,min}	=	0.004596
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{sp,max}	=	570.52 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{sp,min}	=	570.52 МПа

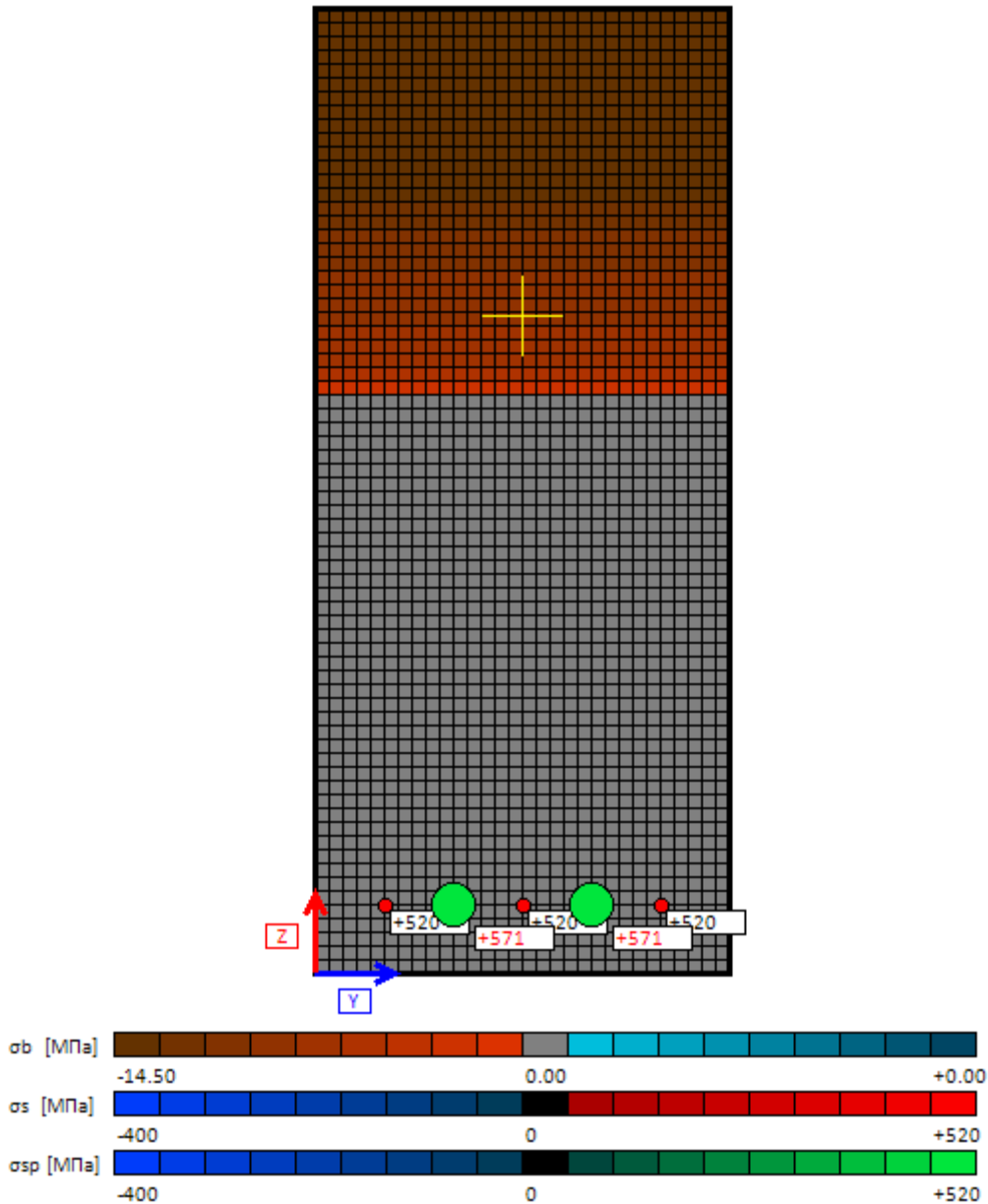
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k _b	=	0.993
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k _s	=	0.999
Относит. коэффициент исп. раст. напр. арматуры	k _{sp}	=	1.915
Остаточные деформации в напрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 2.1: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
- Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	700 мм

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	0.907
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc	=	14.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt	=	1.05 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rsc	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.000
Модуль упругости арматуры	Es	=	200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rsp	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	Rspc	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	=	1.000
Модуль упругости арматуры	Esp	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	=	440 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (3 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
50.0	50.0	10.0	150.0	50.0	10.0	250.0	50.0	10.0

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
100.0	50.0	32.0	200.0	50.0	32.0			

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	547.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N_p	=	-707.7 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	$M_{p,y}$	=	-204.36 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	$M_{p,z}$	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	547.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.094 %
Общее количество итераций	i	=	207

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	-0.000712
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.012076 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	1230.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	870.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	994139 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	20631 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	7171 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	470.85 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	132.10 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.004914
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.003419
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-14.50 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-12.08 МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.004370
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	0.004370
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	512.51 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	512.51 МПа

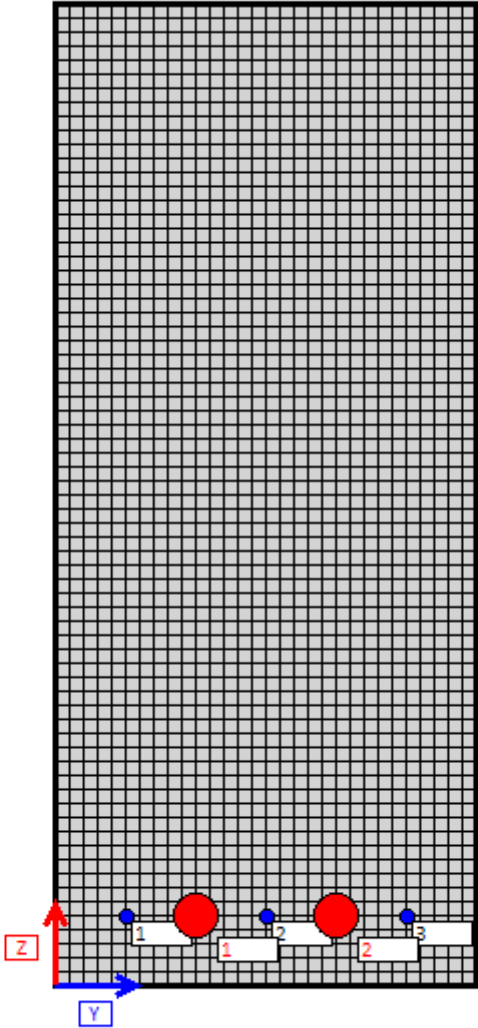
ПАРАМЕТРЫ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{sp,max}$	=	0.004370
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{sp,min}$	=	0.004370
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{sp,max}$	=	578.10 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{sp,min}$	=	578.10 МПа

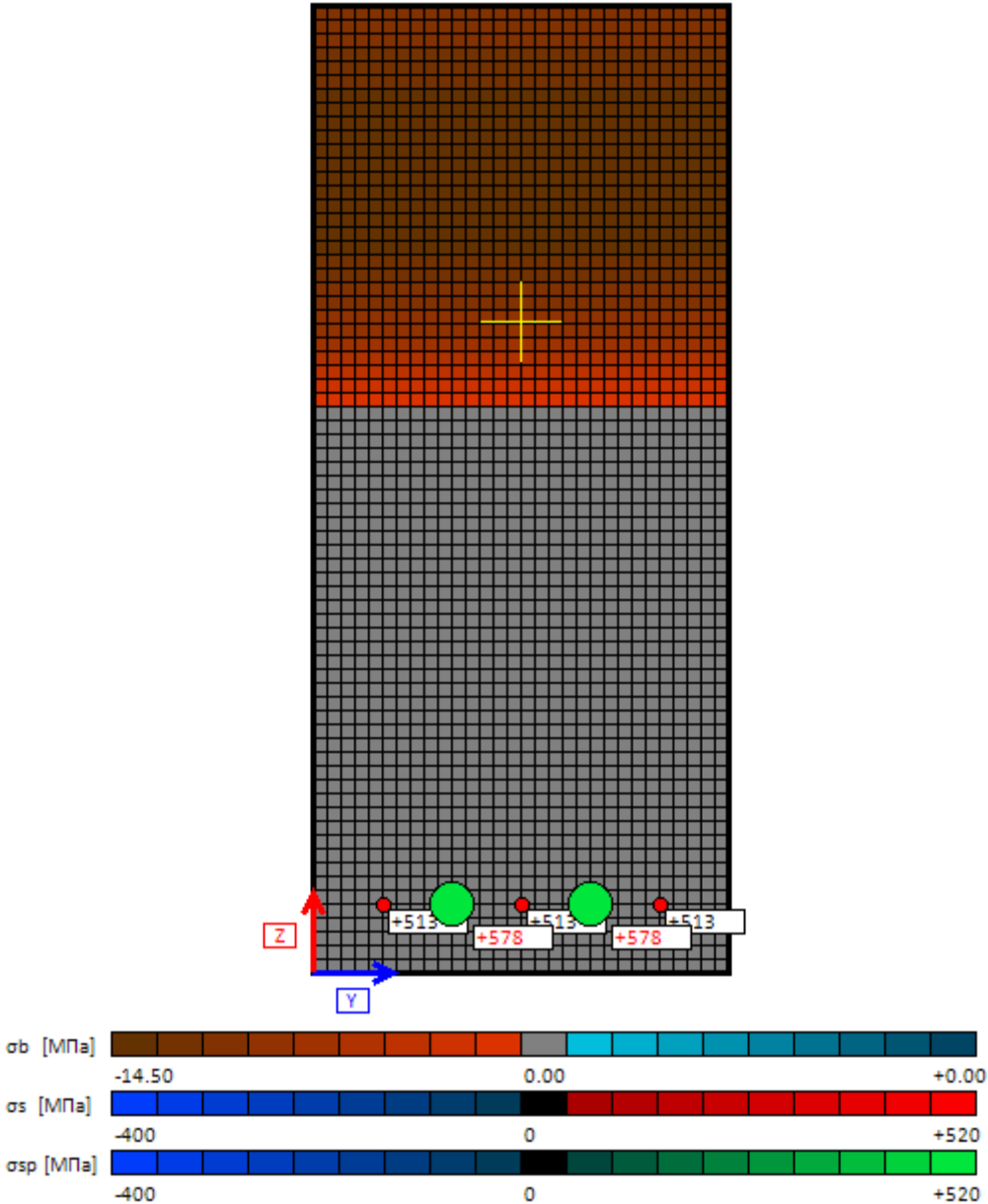
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.984
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	0.950
Относит. коэффициент исп. раст. напр. арматуры	k_{sp}	=	2.416
Остаточные деформации в напрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 2.2 Несущая способность изгибаемого ж.б. элемента прямоугольного сечения (разрушение по сжато-растянутому бетону)

Источник: Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [4].

Пример расчета – № 3.

Исходные данные: железобетонный элемент прямоугольного сечения с размерами $b = 300$ мм, $h = 700$ мм, $a = 60$ мм, $a' = 30$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В30;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне $2\emptyset 10$ Ан600С;
- напрягаемая арматура в растянутой зоне $4\emptyset 32$ Ан600С;
- напрягаемая арматура в сжатой зоне $2\emptyset 16$ Ан600С;
- предварительное напряжение с учетом всех потерь $\sigma_{sp} = 485$ МПа.

Полный изгибающий момент $M_{sh} = 790$ кН·м, в том числе от постоянных и длительных нагрузок $M_l = 750$ кН·м.

Результат: несущая способность обеспечена.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм ⁽²⁾ :	
			криволинейных	кусочно-линейных
Предельный изгибающий момент $M_{ult,sh}$ при действии полной нагрузки ⁽¹⁾	кН·м	792,4	829 / +4,6 %	851 / +7,4 %
Предельный изгибающий момент $M_{ult,l}$ при действии постоянных и длительных нагрузок ⁽¹⁾	кН·м	758,2	780 / +2,9 %	806 / +6,3 %
Несущая способность	–	обеспечена	обеспечена	обеспечена

1. При проведении расчетов изгибаемых элементов необходимо анализировать жесткостные характеристики нагруженных сечений во избежание чрезмерного роста прогибов (особенно для слабоармированных элементов).

2. В расчеты введена базовая арматура класса по прочности на растяжение А600. Переход к арматуре класса Ан600С осуществлен при помощи обобщенных коэффициентов условий работы арматуры $\gamma_s = \gamma_{sp} = 1,0769$.

Задача 2.2: Диаграммы – кусочно-линейные (кратковременные нагрузки)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	700 мм

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B30
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R _{bc}	=	17.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R _{bt}	=	1.15 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ _{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ _{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E _b	=	32500 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R _s	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R _{sc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ _s	=	1.077
Модуль упругости арматуры	E _s	=	200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R _{sp}	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R _{spc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ _{sp}	=	1.077
Модуль упругости арматуры	E _{sp}	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ _{sp}	=	485 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
30.0	60.0	10.0	270.0	60.0	10.0			

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (6 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
80.0	60.0	32.0	112.0	60.0	32.0	188.0	60.0	32.0
220.0	60.0	32.0	80.0	670.0	16.0	220.0	670.0	16.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	851.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N _p	=	-1755.3 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _{p, y}	=	-356.56 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _{p, z}	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	851.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.099 %
Общее количество итераций	i	=	48

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε _x	=	-0.001024
Кривизна вокруг оси Y	1/r _y	=	0.008582 1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/r _z	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A _t	=	870.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A _c	=	1230.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D _{xx}	=	1713426 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D _{yy}	=	41887 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D _{zz}	=	12391 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D _{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y _c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z _c	=	407.81 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY _c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ _c	=	76.89 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b,max}	=	0.002432
Минимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b,min}	=	-0.003489
Максимальное напряжение в бетоне	σ _{b,max}	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	σ _{b,min}	=	-17.00 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	σ _{b,m}	=	-14.37 МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s,max}	=	0.001960
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s,min}	=	0.001960
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{s,max}	=	392.09 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{s,min}	=	392.09 МПа

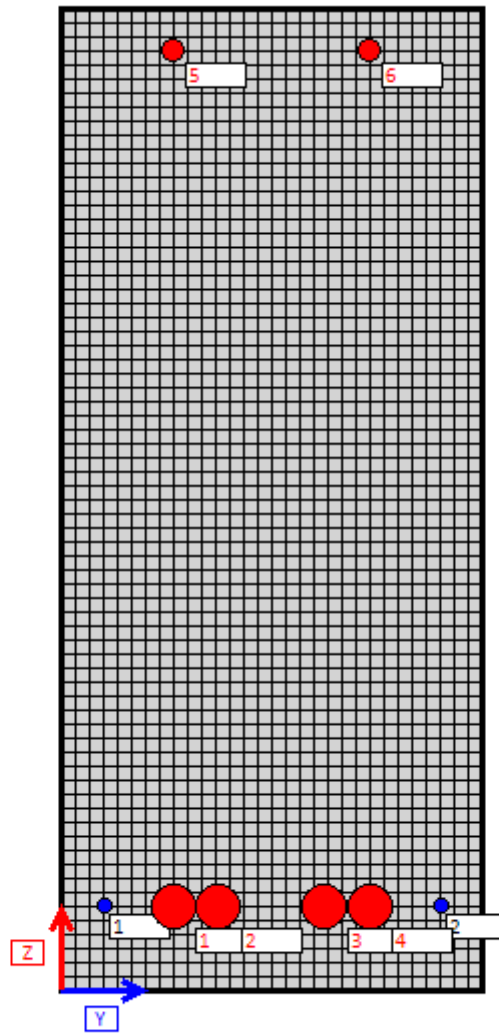
ПАРАМЕТРЫ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{sp,max}	=	0.001960
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{sp,min}	=	-0.003275
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{sp,max}	=	549.81 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{sp,min}	=	-169.92 МПа

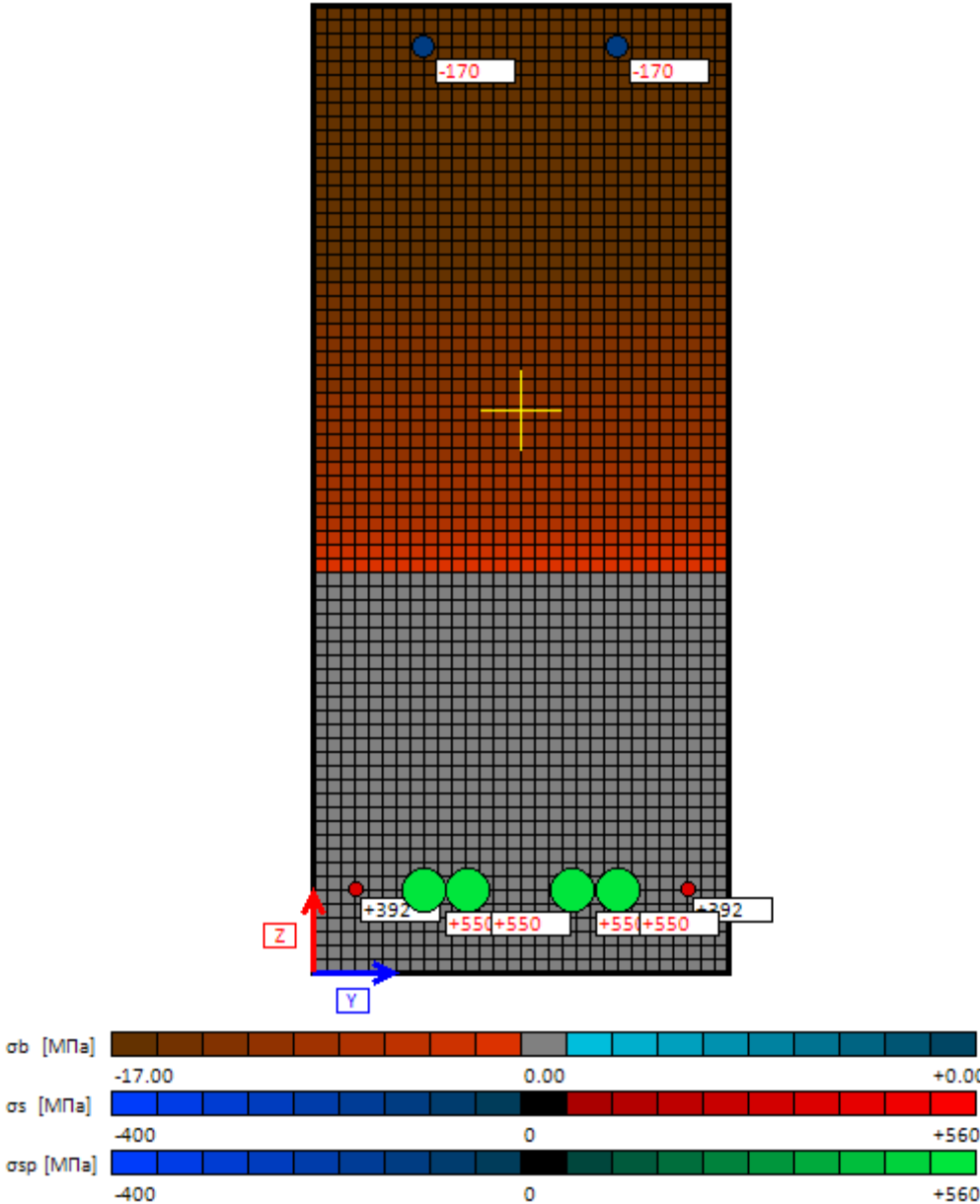
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k _b	=	0.997
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k _s	=	0.408
Относит. коэффициент исп. раст. напр. арматуры	k _{sp}	=	0.825

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 2.2: Диаграммы – криволинейные (кратковременные нагрузки)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
- Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	700 мм

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B30
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.000
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R_{bc}	=	17.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R_{bt}	=	1.15 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	=	32500 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R_s	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R_{sc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.077
Модуль упругости арматуры	E_s	=	200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R_{sp}	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R_{spc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	=	1.077
Модуль упругости арматуры	E_{sp}	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	=	485 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
30.0	60.0	10.0	270.0	60.0	10.0			

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (6 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
80.0	60.0	32.0	112.0	60.0	32.0	188.0	60.0	32.0
220.0	60.0	32.0	80.0	670.0	16.0	220.0	670.0	16.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	829.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N_p	=	-1755.3 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	$M_{p,y}$	=	-364.72 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	$M_{p,z}$	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	829.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.093 %
Общее количество итераций	i	=	122

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	-0.000986
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.008190 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	810.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	1290.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	1780917 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	45346 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	12774 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	388.49 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	52.93 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.002155
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.003496
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-17.00 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-14.39 МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.001705
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	0.001705
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	340.93 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	340.93 МПа

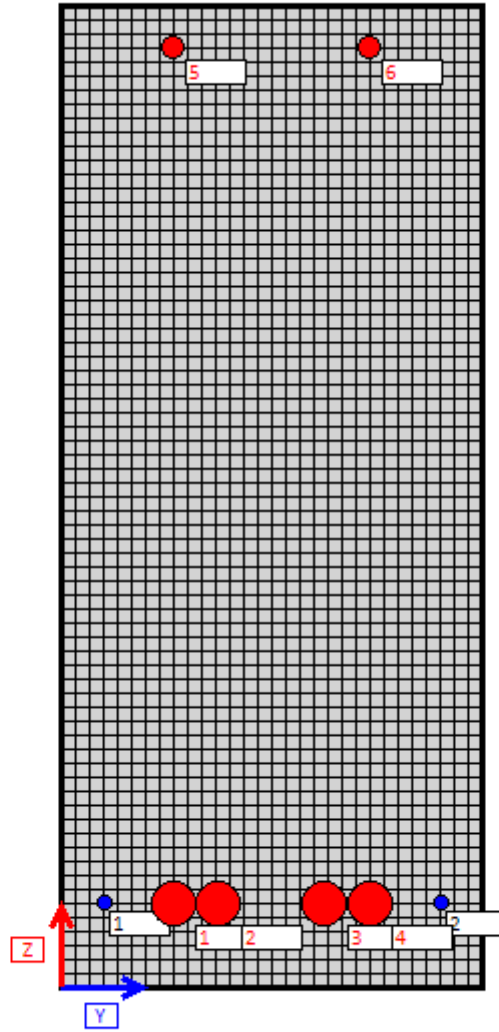
ПАРАМЕТРЫ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{sp,max}$	=	0.001705
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{sp,min}$	=	-0.003291
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{sp,max}$	=	561.92 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{sp,min}$	=	-27.84 МПа

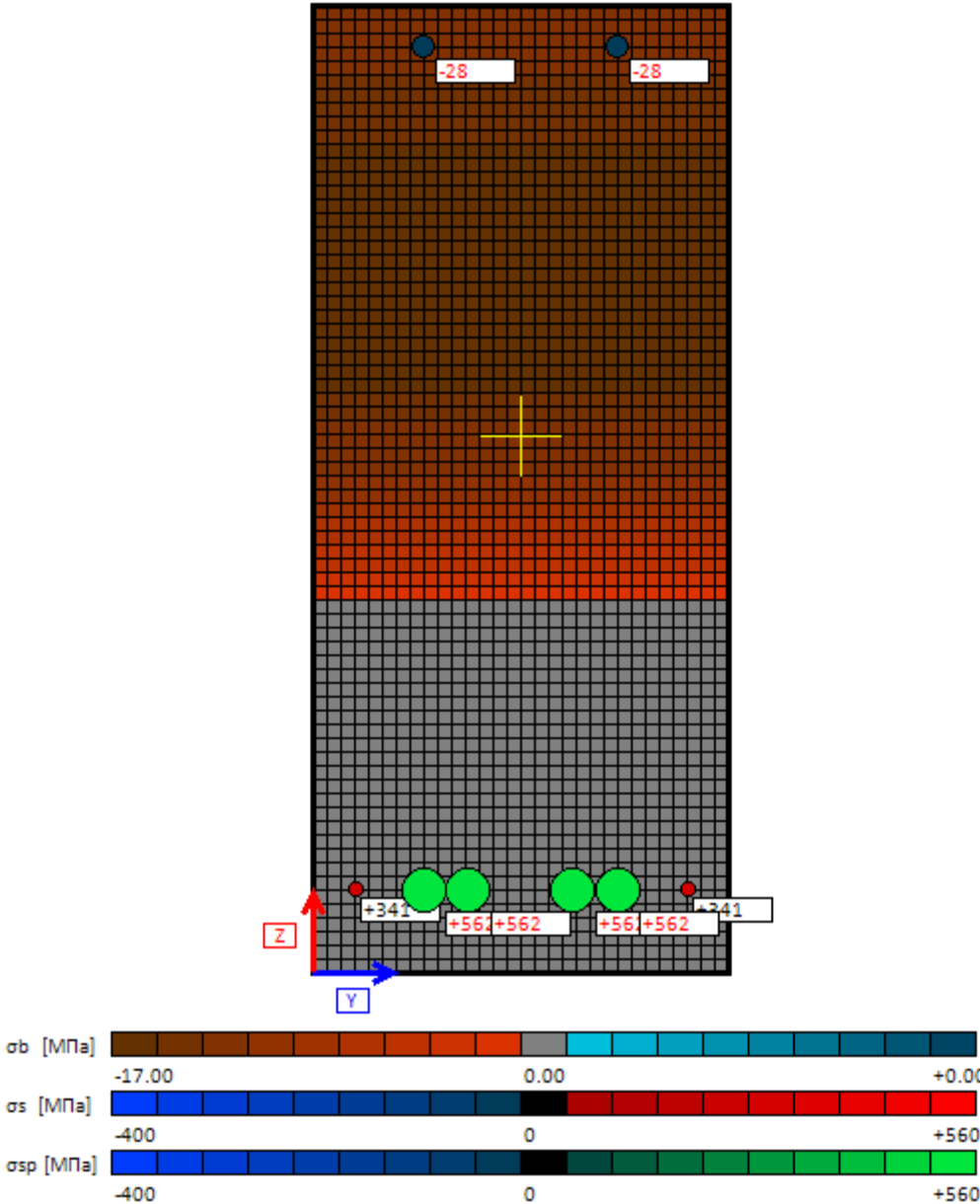
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.999
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	0.355
Относит. коэффициент исп. раст. напр. арматуры	k_{sp}	=	1.034
Остаточные деформации в напрягаемой арматуре			

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 2.2: Диаграммы – кусочно-линейные (постоянные и длительные нагрузки)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	700 мм

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B30
Диаграмма состояния бетона		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R _{bc}	=	17.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R _{bt}	=	1.15 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ _{bc}	=	0.900
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ _{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E _b	=	32500 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R _s	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R _{sc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ _s	=	1.077
Модуль упругости арматуры	E _s	=	200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R _{sp}	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R _{spc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ _{sp}	=	1.077
Модуль упругости арматуры	E _{sp}	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ _{sp}	=	485 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
30.0	60.0	10.0	270.0	60.0	10.0			

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (6 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
80.0	60.0	32.0	112.0	60.0	32.0	188.0	60.0	32.0
220.0	60.0	32.0	80.0	670.0	16.0	220.0	670.0	16.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	806.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N _p	=	-1755.3 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _{p, y}	=	-356.56 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _{p, z}	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0	кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	806.00	кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00	кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.070	%
Общее количество итераций	i	=	51	

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε _x	=	-0.001035	
Кривизна вокруг оси Y	1/r _y	=	0.007975	1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/r _z	=	0.000000	1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A _t	=	780.0	см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A _c	=	1320.0	см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D _{xx}	=	1695388	кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D _{yy}	=	44121	кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D _{zz}	=	12226	кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D _{yz}	=	0	кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y _c	=	150.00	мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z _c	=	386.49	мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY _c	=	0.00	мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ _c	=	55.58	мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b,max}	=	0.002007	
Минимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b,min}	=	-0.003496	
Максимальное напряжение в бетоне	σ _{b,max}	=	0.00	МПа
Минимальное напряжение в бетоне	σ _{b,min}	=	-15.30	МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	σ _{b,m}	=	-13.05	МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s,max}	=	0.001569	
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s,min}	=	0.001569	
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{s,max}	=	313.72	МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{s,min}	=	313.72	МПа

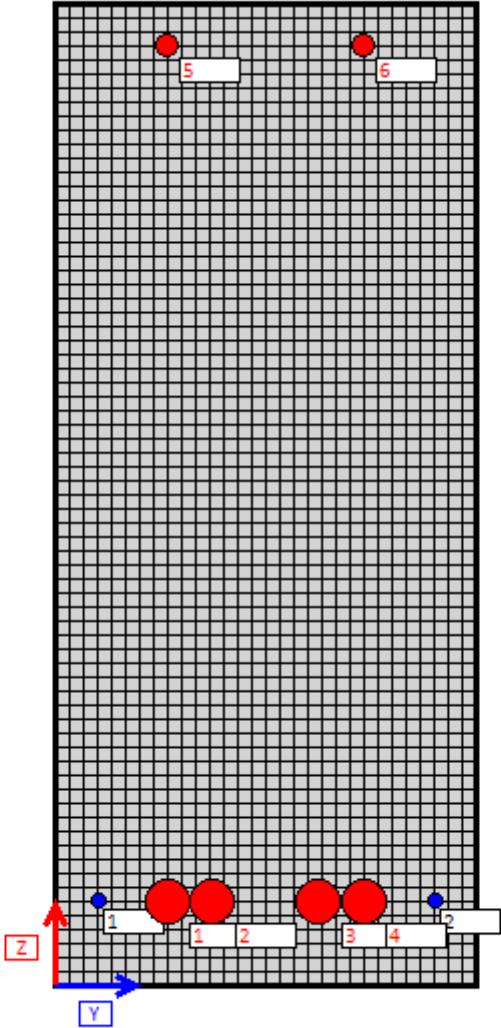
ПАРАМЕТРЫ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{sp,max}	=	0.001569	
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{sp,min}	=	-0.003296	
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{sp,max}	=	540.18	МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{sp,min}	=	-174.29	МПа

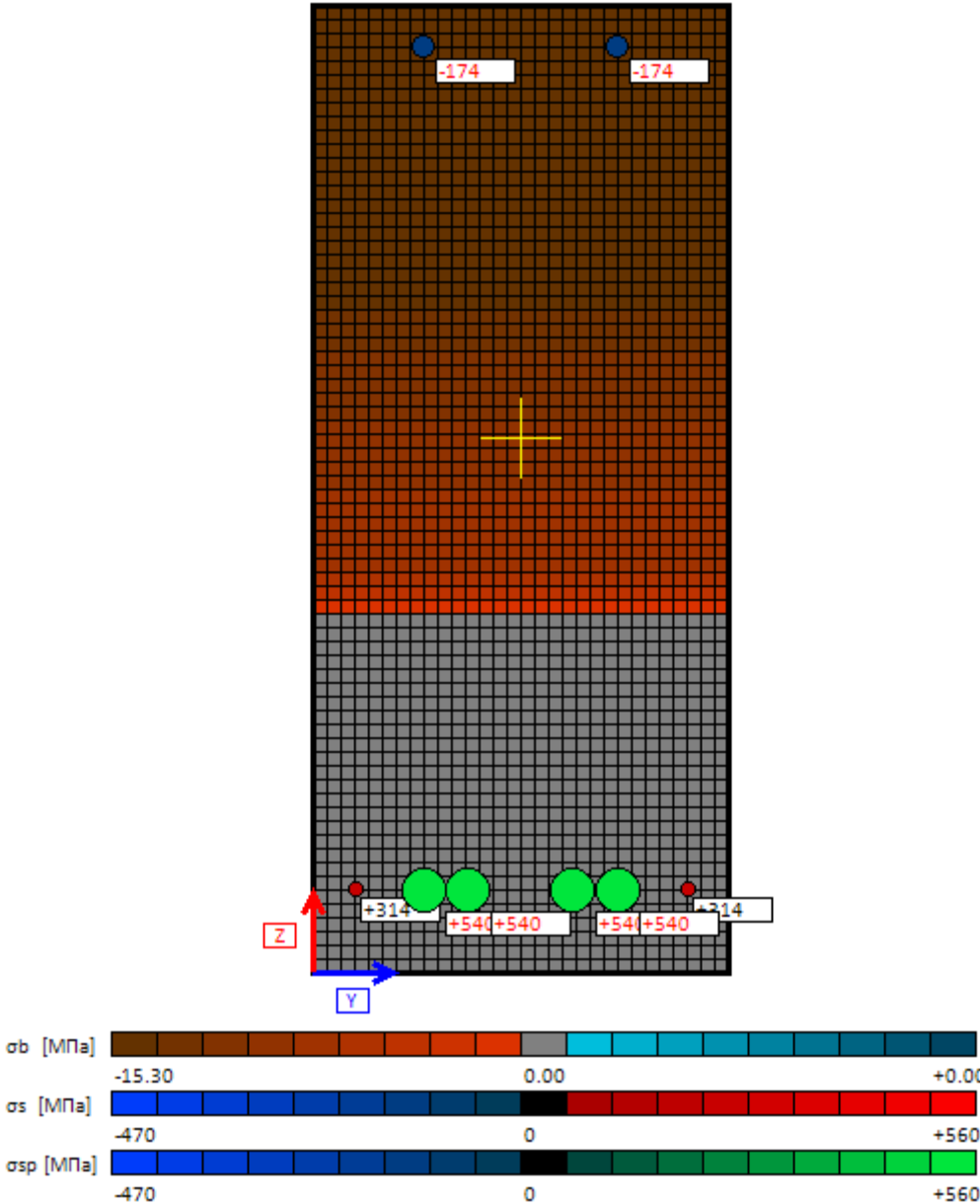
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k _b	=	0.999
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k _s	=	0.327
Относит. коэффициент исп. раст. напр. арматуры	k _{sp}	=	0.660

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 2.2: Диаграммы – криволинейные (постоянные и длительные нагрузки)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПРОЧНОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

- СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
- Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	прямоугольное
Ширина сечения	b	=	300 мм
Высота сечения	h	=	700 мм

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B30
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.000
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	R _{bc}	=	17.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	R _{bt}	=	1.15 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	0.900
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	0.000
Начальный модуль упругости бетона	E _b	=	32500 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R _s	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R _{sc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.077
Модуль упругости арматуры	E _s	=	200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	R _{sp}	=	520 МПа
Расчетное сопротивление арматуры сжатию	R _{spc}	=	400 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	=	1.077
Модуль упругости арматуры	E _{sp}	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	=	485 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
30.0	60.0	10.0	270.0	60.0	10.0			

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (6 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
80.0	60.0	32.0	112.0	60.0	32.0	188.0	60.0	32.0
220.0	60.0	32.0	80.0	670.0	16.0	220.0	670.0	16.0

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	780.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N_p	=	-1755.3 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	$M_{p,y}$	=	-364.72 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	$M_{p,z}$	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	780.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.099 %
Общее количество итераций	i	=	124

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	-0.000986
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.007623 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	720.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	1380.0 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	1779321 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	47143 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	12728 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	150.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	367.40 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	31.84 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.001776
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.003484
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-15.30 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-13.07 МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.001357
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	0.001357
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	271.40 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	271.40 МПа

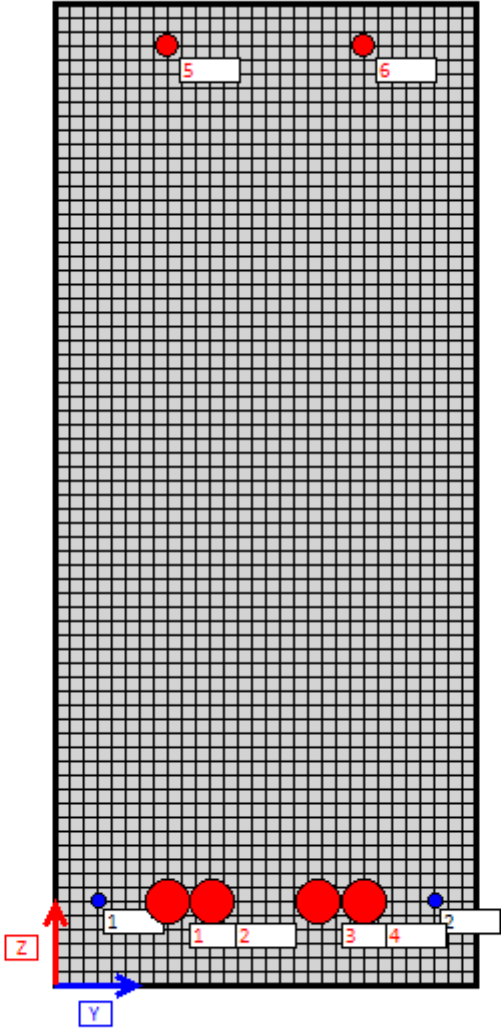
ПАРАМЕТРЫ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{sp,max}$	=	0.001357
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{sp,min}$	=	-0.003293
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{sp,max}$	=	549.50 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{sp,min}$	=	-28.30 МПа

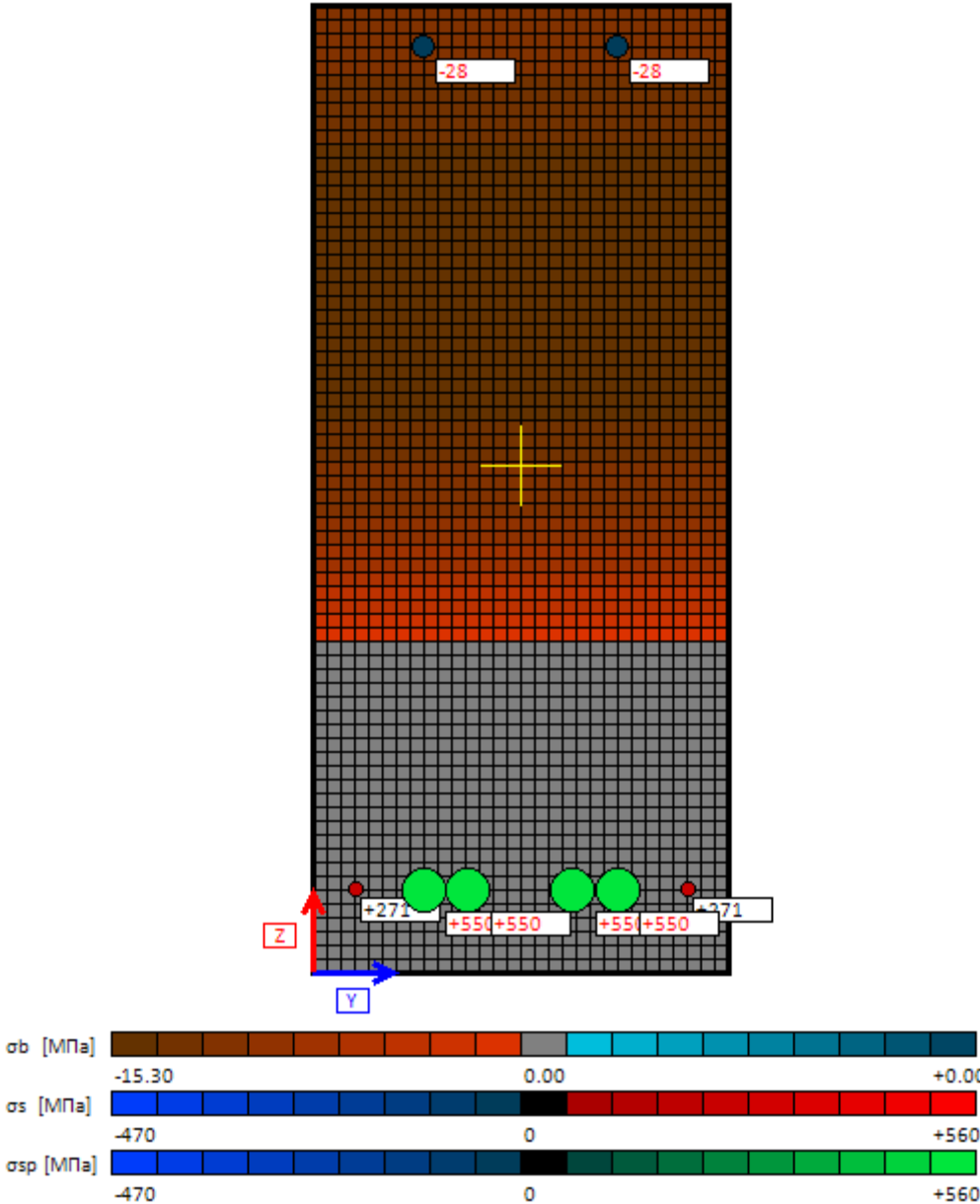
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.995
Относит. коэффициент исп. раст. ненапр. арматуры	k_s	=	0.283
Относит. коэффициент исп. раст. напр. арматуры	k_{sp}	=	0.823

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 2.3 Трещиностойкость многопустотной плиты перекрытия

Источник: Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [4].

Пример расчета – № 15.

Исходные данные: многопустотная плита перекрытия с размерами $b = 1490$ мм, $h = 220$ мм, $a = 27$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В20;
- напрягаемая арматура в растянутой зоне $4\Phi 14$ Ан600С;
- предварительное напряжение с учетом всех потерь $\sigma_{sp} = 485$ МПа.

Полный изгибающий момент $M_{sh} = 57,8$ кН·м, в том числе от постоянных и длительных нагрузок $M_l = 46,5$ кН·м.

Результат: трещиностойкость обеспечена.

Сравнение результатов расчета ⁽¹⁾

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Момент трещинообразования M_{crc}	кН·м	54,7	63,4 ⁽²⁾ / +15,9 %	67,0 / +22,5 %
Образование трещин в стадии эксплуатации	–	образуются	не образуются	не образуются
Ширина раскрытия трещин при непродолжительном действии нагрузки $a_{crc,sh}$ ⁽¹⁾	мм	0,020	–	–
Трещиностойкость	–	обеспечена	обеспечена	обеспечена

1. Проверяется только непродолжительное раскрытие трещин как самое неблагоприятное.

2. Криволинейная диаграмма бетона принята с учетом влияния градиентов деформаций.

Задача 2.3: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		= произвольное
Габарит сечения по оси Y	Y	= 1490 мм
Габарит сечения по оси Z	Z	= 220 мм

ПАРАМЕТРЫ

Огранич. раскрыт. трещин напрягаемой арматуры:		
- непродолжительное	asp,crc,ult,sh	= 0.400 мм
- продолжительное	asp,crc,ult,l	= 0.300 мм
Расчетный диаметр напрягаемой арматуры	dsp	= 14.0 мм
Учет коэффициента ψ_s		= да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		= В20
Диаграмма состояния бетона		= трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc,ser	= 15.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt,ser	= 1.35 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	= 1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	= 1.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	= 27500 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		= А600
Диаграмма состояния арматуры		= трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rsp,ser	= 600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	= 1.000
Модуль упругости арматуры	Esp	= 200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	= 485 МПа

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (4 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
-680.0	27.0	14.0	-290.0	27.0	14.0	290.0	27.0	14.0
680.0	27.0	14.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольные силы:		
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	= 0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	= 0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:		
- при действии кратковременных нагрузок	My,sh	= 57.80 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My,l	= 46.50 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:		
- при действии кратковременных нагрузок	Mz,sh	= 0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz,l	= 0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	Np	= -298.6 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	Mp,y	= -24.09 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mp,z	= 0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольные усилия:

- при действии кратковременных нагрузок	N_{sh}	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	N_l	=	0.0 кН

Изгибающие моменты вокруг оси Y:

- при действии кратковременных нагрузок	$M_{y, sh}$	=	57.80 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{y, l}$	=	46.50 кН·м

Изгибающие моменты вокруг оси Z:

- при действии кратковременных нагрузок	$M_{z, sh}$	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{z, l}$	=	0.00 кН·м

Итерационная точность:

- при действии кратковременных нагрузок	δ_{sh}	=	0.089 %
- при действии длительных нагрузок	δ_l	=	0.000 %

Общее количество итераций

i	=	215
-----	---	-----

РЕШЕНИЕ

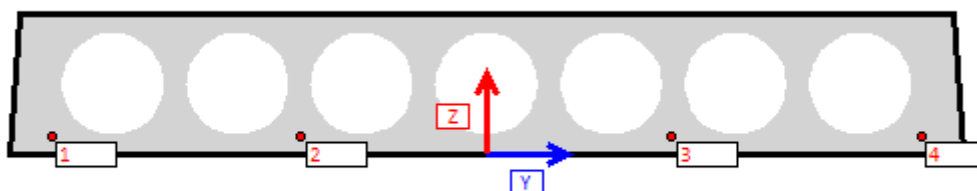
Статус решения

= найдено

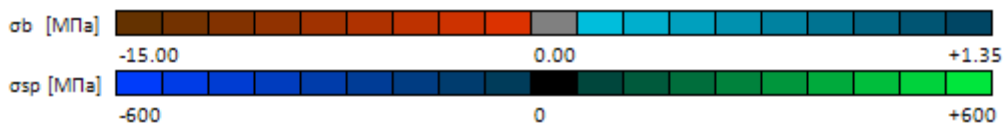
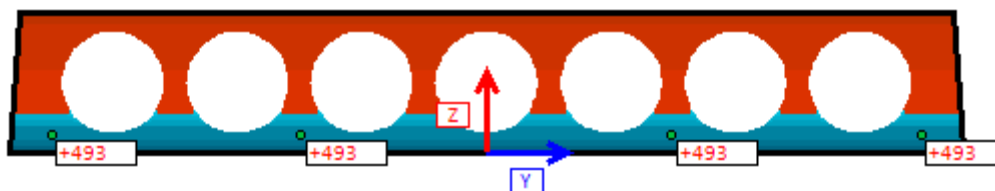
Трещины

= не образуются

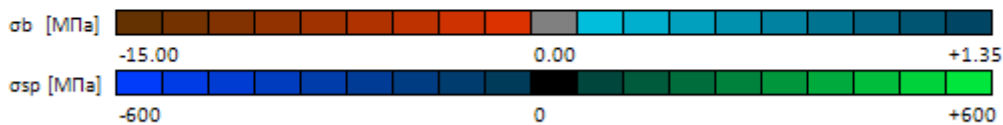
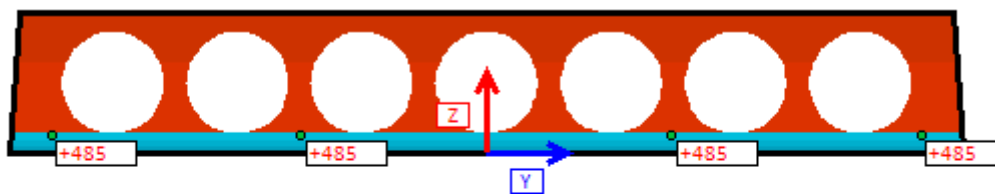
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Напряжения от кратковременных нагрузок



Напряжения от постоянных и длительных нагрузок

Задача 2.3: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
2. Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	произвольное
Габарит сечения по оси Y	Y	=	1490 мм
Габарит сечения по оси Z	Z	=	220 мм

ПАРАМЕТРЫ

Огранич. раскр. трещин напрягаемой арматуры:			
- непродолжительное	asp, crc, ult, sh	=	0.400 мм
- продолжительное	asp, crc, ult, l	=	0.300 мм
Расчетный диаметр напрягаемой арматуры	dsp	=	14.0 мм
Учет коэффициента ψ_s		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B20
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	1.067
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	$R_{bc, ser}$	=	15.00 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	$R_{bt, ser}$	=	1.35 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	=	27500 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{sp, ser}$	=	600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	=	1.000
Модуль упругости арматуры	E_{sp}	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	=	485 МПа

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (4 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
-680.0	27.0	14.0	-290.0	27.0	14.0	290.0	27.0	14.0
680.0	27.0	14.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольные силы:			
- при действии кратковременных нагрузок	N_{sh}	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	N_l	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{y, sh}$	=	57.80 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{y, l}$	=	46.50 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{z, sh}$	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{z, l}$	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N_p	=	-298.6 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	$M_{p,y}$	=	-24.17 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	$M_{p,z}$	=	0.00 кН·м

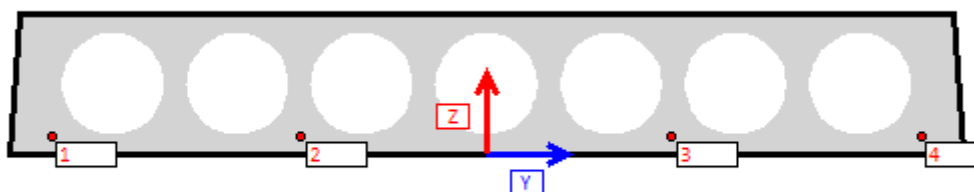
ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольные усилия:			
- при действии кратковременных нагрузок	N_{sh}	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	N_l	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{y,sh}$	=	57.80 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{y,l}$	=	46.50 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	$M_{z,sh}$	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	$M_{z,l}$	=	0.00 кН·м
Итерационная точность:			
- при действии кратковременных нагрузок	δ_{sh}	=	0.045 %
- при действии длительных нагрузок	δ_l	=	0.018 %
Общее количество итераций	i	=	570

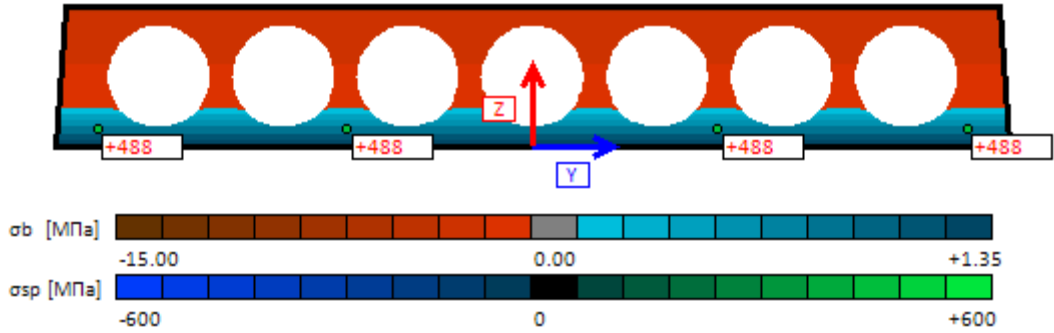
РЕШЕНИЕ

Статус решения	= найдено
Трещины	= не образуются

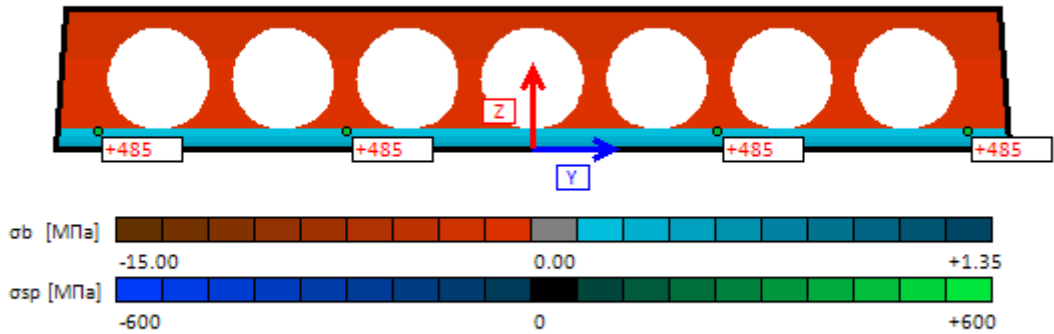
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Напряжения от кратковременных нагрузок



Напряжения от постоянных и длительных нагрузок

Задача 2.4 Трещиностойкость ребристой плиты перекрытия

Источник: Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [4].

Пример расчета – № 16.

Исходные данные: ребристая плита перекрытия с размерами $b = 80$ мм, $h = 350$ мм, $b_f = 475$ мм, $h_f = 50$ мм, $a = 50$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В25;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне 1Ø10 Ан600С;
- ненапрягаемая арматура в сжатой зоне 1Ø10 Ан600С;
- напрягаемая арматура в растянутой зоне 1Ø25 Ан600С;
- предварительное напряжение с учетом всех потерь $\sigma_{sp} = 305$ МПа.

Полный изгибающий момент $M_{sh} = 66,0$ кН·м, в том числе от постоянных и длительных нагрузок $M_l = 60,0$ кН·м.

Результат: трещиностойкость обеспечена.

Сравнение результатов расчета ⁽¹⁾

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Ширина раскрытия трещин при продолжительном действии нагрузки $a_{cr,c,l}^{(1)}$	мм	0,107	0,135 ⁽²⁾ / +26,2 %	0,128 / +19,6 %
Трещиностойкость	–	обеспечена	обеспечена	Обеспечена

1. Проверяется только продолжительное раскрытие трещин как самое неблагоприятное.

2. Криволинейная диаграмма бетона принята с учетом влияния градиентов деформаций.

Задача 2.4: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		= тавровое
Ширина ребра сечения	b	= 80 мм
Полная высота сечения	h	= 350 мм
Ширина полки сечения	bf	= 475 мм
Высота полки сечения	hf	= 50 мм

ПАРАМЕТРЫ

Огранич. раскр. трещин ненапрягаемой арматуры:		
- непродолжительное	as,crc,ult,sh	= 0.400 мм
- продолжительное	as,crc,ult,l	= 0.300 мм
Огранич. раскр. трещин напрягаемой арматуры:		
- непродолжительное	asp,crc,ult,sh	= 0.400 мм
- продолжительное	asp,crc,ult,l	= 0.300 мм
Расчетный диаметр ненапрягаемой арматуры	ds	= 10.0 мм
Расчетный диаметр напрягаемой арматуры	dsp	= 25.0 мм
Учет коэффициента ψ_s		= да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		= В25
Диаграмма состояния бетона		= трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	Rbc,ser	= 18.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	Rbt,ser	= 1.55 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	= 1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	= 1.000
Начальный модуль упругости бетона	Eb	= 30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		= А600
Диаграмма состояния арматуры		= трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rs,ser	= 600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	= 1.000
Модуль упругости арматуры	Es	= 200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		= А600
Диаграмма состояния арматуры		= трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	Rsp,ser	= 600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	= 1.000
Модуль упругости арматуры	Esp	= 200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	= 305 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	25.0	10.0	40.0	325.0	10.0			

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (1 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	50.0	25.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольные силы:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	66.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	60.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	Np	=	-149.7 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	Mp, y	=	-26.33 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mp, z	=	0.00 кН·м

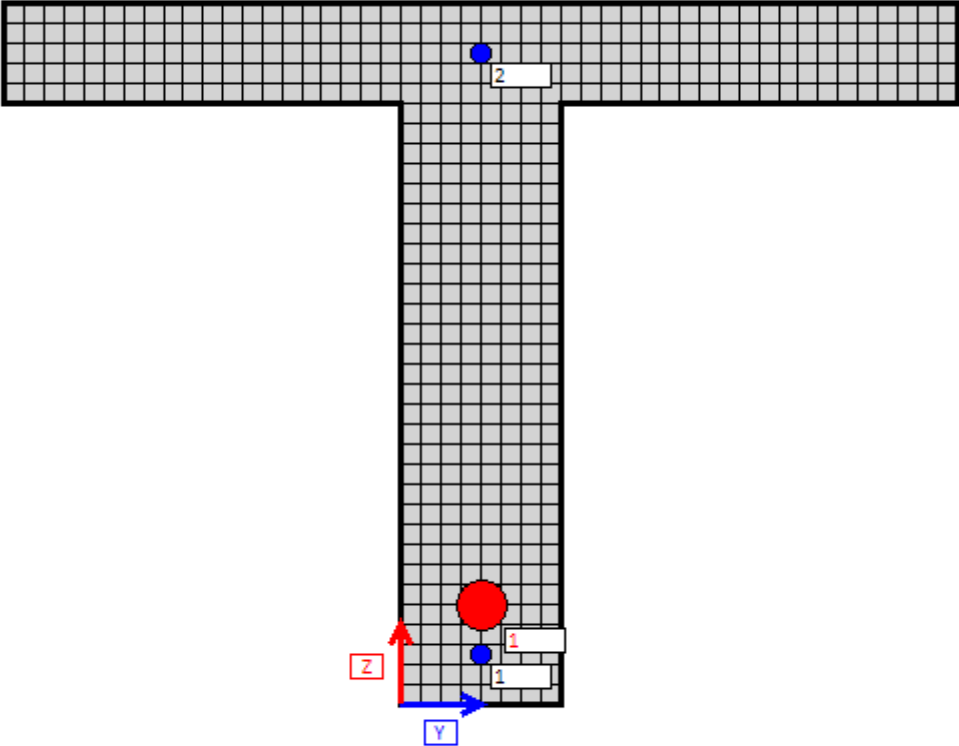
ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольные усилия:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	66.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	60.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м
Итерационная точность:			
- при действии кратковременных нагрузок	δsh	=	0.018 %
- при действии длительных нагрузок	δl	=	0.050 %
Общее количество итераций	i	=	402

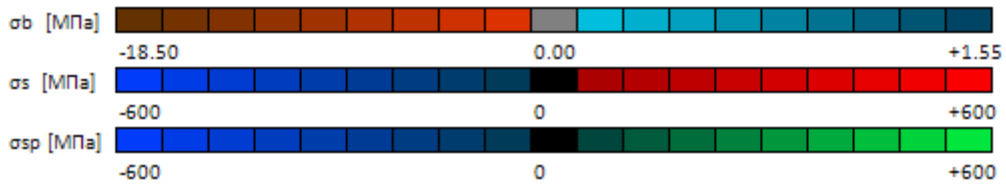
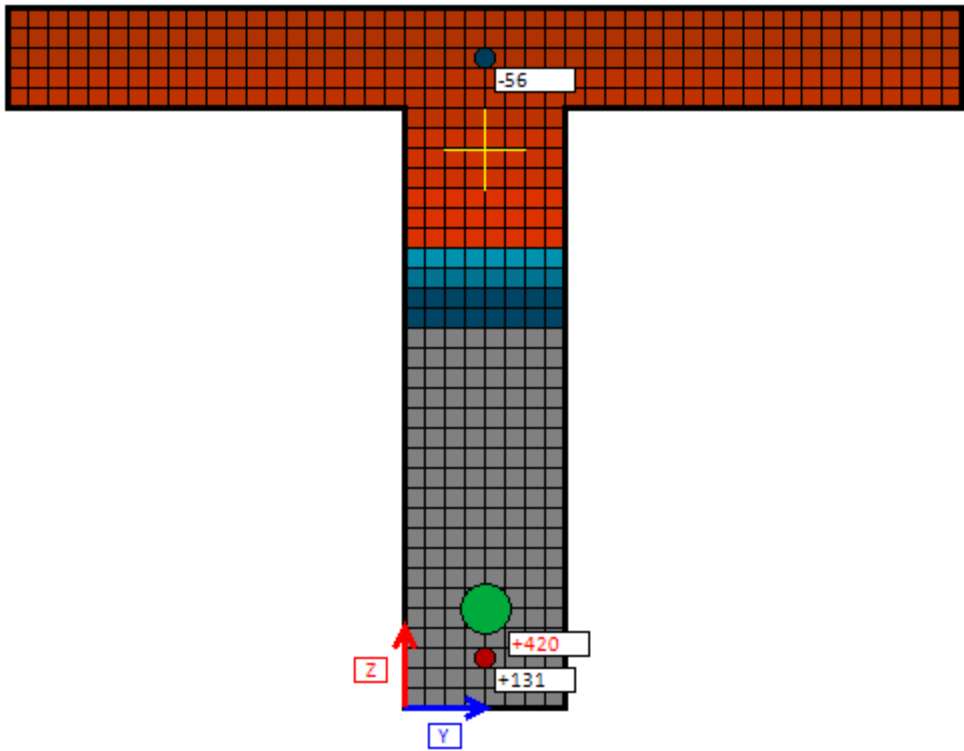
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Трещины		=	образуются
Напряжения в ненапрягаемой растянутой арматуре:			
- сразу после образования трещин	σs, crc	=	31.95 МПа
- при действии кратковременных нагрузок	σs, sh	=	172.16 МПа
- при действии постоянных и длительных нагр.	σs, l	=	130.89 МПа
Ширина раскр. трещин в ненапрягаемой арматуре:			
- непродолжительная	as, crc, sh	=	0.079 мм
- продолжительная	as, crc, l	=	0.060 мм
Напряжения в напрягаемой растянутой арматуре:			
- сразу после образования трещин	σsp, crc	=	335.25 МПа
- при действии кратковременных нагрузок	σsp, sh	=	457.53 МПа
- при действии постоянных и длительных нагр.	σsp, l	=	420.28 МПа
Ширина раскр. трещин в напрягаемой арматуре:			
- непродолжительная	asp, crc, sh	=	0.165 мм
- продолжительная	asp, crc, l	=	0.128 мм
Коэффициент исполъз. сеч. по трещиностойкости	kcrc	=	0.425

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Напряжения от постоянных и длительных нагрузок

Задача 2.4: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
2. Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	тавровое
Ширина ребра сечения	b	=	80 мм
Полная высота сечения	h	=	350 мм
Ширина полки сечения	bf	=	475 мм
Высота полки сечения	hf	=	50 мм

ПАРАМЕТРЫ

Огранич. раскр. трещин ненапрягаемой арматуры:			
- непродолжительное	as, crc, ult, sh	=	0.400 мм
- продолжительное	as, crc, ult, l	=	0.300 мм
Огранич. раскр. трещин напрягаемой арматуры:			
- непродолжительное	asp, crc, ult, sh	=	0.400 мм
- продолжительное	asp, crc, ult, l	=	0.300 мм
Расчетный диаметр ненапрягаемой арматуры	ds	=	10.0 мм
Расчетный диаметр напрягаемой арматуры	dsp	=	25.0 мм
Учет коэффициента ψ_s		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	0.976
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	$R_{bc, ser}$	=	18.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	$R_{bt, ser}$	=	1.55 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{s, ser}$	=	600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.000
Модуль упругости арматуры	E_s	=	200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{sp, ser}$	=	600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	=	1.000
Модуль упругости арматуры	E_{sp}	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	=	305 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	25.0	10.0	40.0	325.0	10.0			

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (1 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	50.0	25.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольные силы:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	66.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	60.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	Np	=	-149.7 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	Mp, y	=	-26.33 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	Mp, z	=	0.00 кН·м

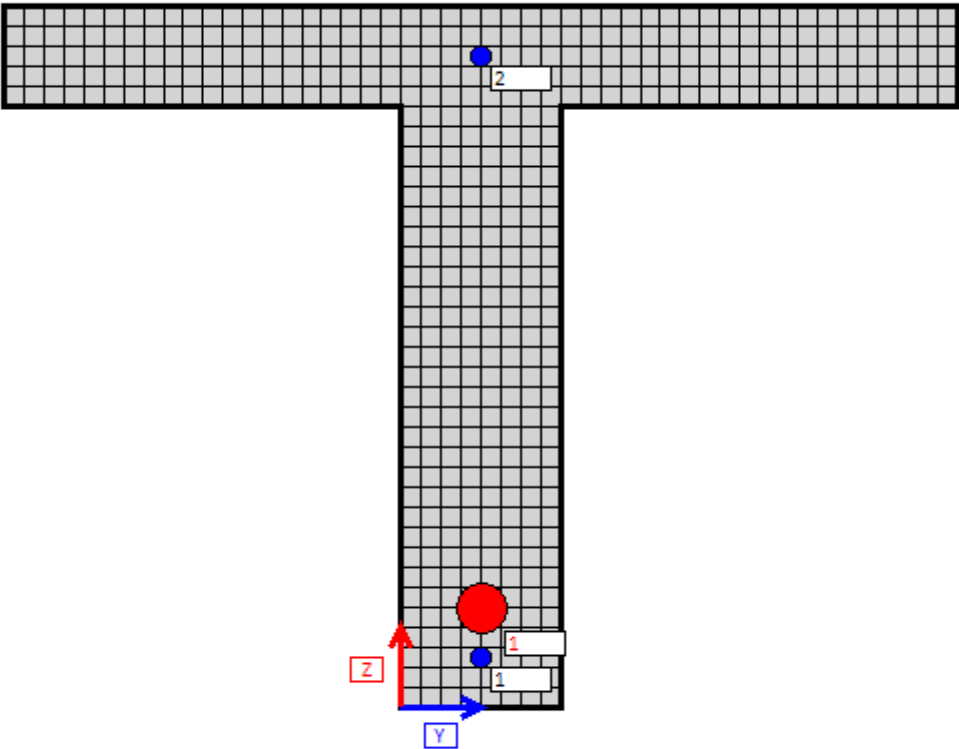
ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольные усилия:			
- при действии кратковременных нагрузок	Nsh	=	0.0 кН
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Nl	=	0.0 кН
Изгибающие моменты вокруг оси Y:			
- при действии кратковременных нагрузок	My, sh	=	66.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	My, l	=	60.00 кН·м
Изгибающие моменты вокруг оси Z:			
- при действии кратковременных нагрузок	Mz, sh	=	0.00 кН·м
- при действии постоянных и длительных нагрузок	Mz, l	=	0.00 кН·м
Итерационная точность:			
- при действии кратковременных нагрузок	δsh	=	0.056 %
- при действии длительных нагрузок	δl	=	0.063 %
Общее количество итераций	i	=	738

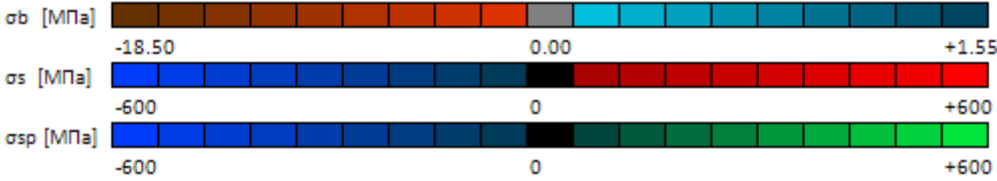
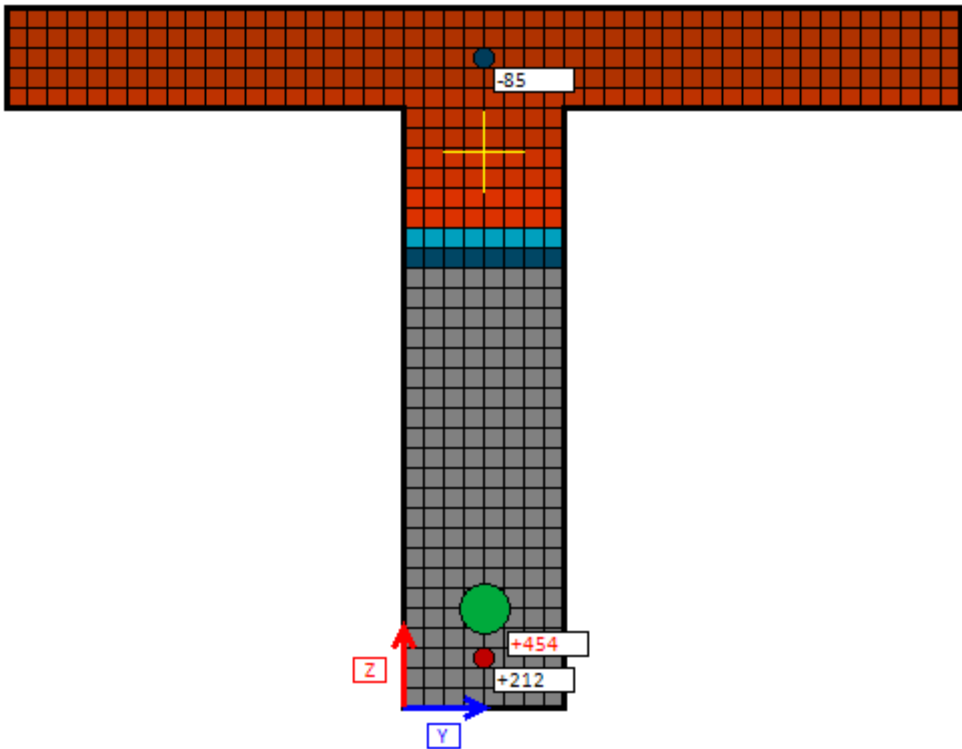
РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Трещины		=	образуются
Напряжения в ненапрягаемой растянутой арматуре:			
- сразу после образования трещин	σs, crc	=	21.90 МПа
- при действии кратковременных нагрузок	σs, sh	=	211.79 МПа
- при действии постоянных и длительных нагр.	σs, l	=	140.37 МПа
Ширина раскр. трещин в ненапрягаемой арматуре:			
- непродолжительная	as, crc, sh	=	0.101 мм
- продолжительная	as, crc, l	=	0.066 мм
Напряжения в напрягаемой растянутой арматуре:			
- сразу после образования трещин	σsp, crc	=	328.57 МПа
- при действии кратковременных нагрузок	σsp, sh	=	454.46 МПа
- при действии постоянных и длительных нагр.	σsp, l	=	423.90 МПа
Ширина раскр. трещин в напрягаемой арматуре:			
- непродолжительная	asp, crc, sh	=	0.169 мм
- продолжительная	asp, crc, l	=	0.135 мм
Коэффициент исполъз. сеч. по трещиностойкости	kcrc	=	0.451

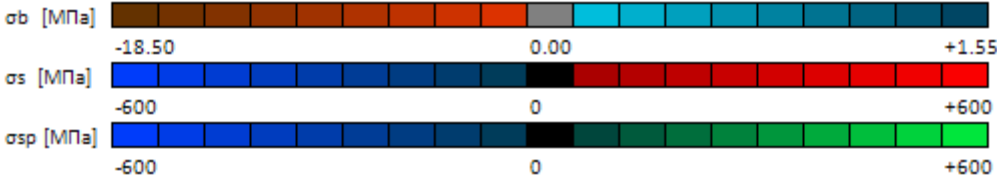
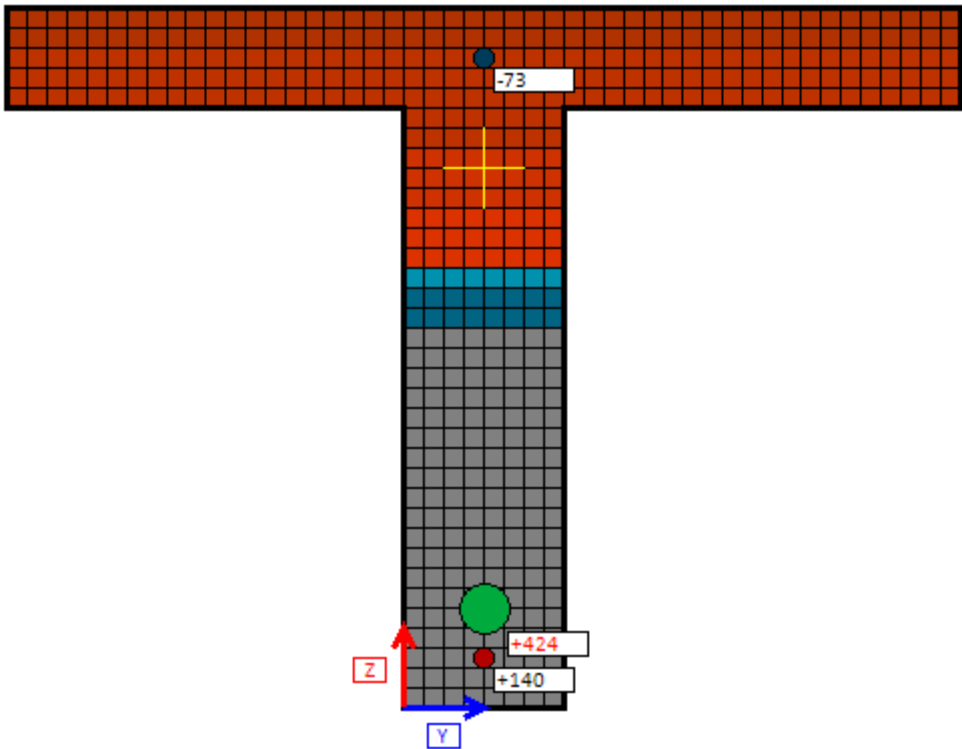
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ОБЕСПЕЧЕНА



Поперечное сечение элемента



Напряжения от кратковременных нагрузок



Напряжения от постоянных и длительных нагрузок

Задача 2.5 Кривизна ребристой плиты перекрытия

Источник: Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М. Минстрой России, 2015 [4].

Пример расчета – № 18.

Исходные данные: ребристая плита перекрытия с размерами $b = 80$ мм, $h = 350$ мм, $b_f = 475$ мм, $h_f = 50$ мм, $a = 50$ мм:

- бетон тяжелый класса по прочности на сжатие В25;
- ненапрягаемая арматура в растянутой зоне 1Ø10 Ан600С;
- ненапрягаемая арматура в сжатой зоне 1Ø10 Ан600С;
- напрягаемая арматура в растянутой зоне 1Ø25 Ан600С;
- предварительное напряжение с учетом всех потерь $\sigma_{sp} = 145$ МПа.

Изгибающий момент при действии постоянных и длительных нагрузок $M_l = 60,0$ кН·м.

Сравнение результатов расчета

Параметр	Ед. изм.	Источник	NDM при использовании диаграмм:	
			криволинейных	кусочно-линейных
Кривизна при действии постоянных и длительных нагрузок ($1/r$)	1/м	0,00723	0,00733 ⁽¹⁾ / +1,0 %	0,00712 / -1,5 %

1. Криволинейная диаграмма бетона принята с учетом влияния градиентов деформаций. Относительная влажность воздуха окружающей среды принята 73 % (г. Москва).

Задача 2.5: Диаграммы – кусочно-линейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		= тавровое
Ширина ребра сечения	b	= 80 мм
Полная высота сечения	h	= 350 мм
Ширина полки сечения	bf	= 475 мм
Высота полки сечения	hf	= 50 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		= итеративный
Характеристика ползучести бетона	φ	= 2.500
Работа бетона между трещинами (ψ_s)		= да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		= B25
Диаграмма состояния бетона		= трехлинейная
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	$R_{bc,ser}$	= 18.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	$R_{bt,ser}$	= 1.55 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	= 1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	= 1.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	= 30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		= A600
Диаграмма состояния арматуры		= трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{s,ser}$	= 600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	= 1.000
Модуль упругости арматуры	E_s	= 200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		= A600
Диаграмма состояния арматуры		= трехлинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{sp,ser}$	= 600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	= 1.000
Модуль упругости арматуры	E_{sp}	= 200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	= 145 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	25.0	10.0	40.0	325.0	10.0			

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (1 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	50.0	25.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	= 0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	= 60.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	= 0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N_p	=	-71.2 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	$M_{p,y}$	=	-10.72 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	$M_{p,z}$	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M_y	=	60.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M_z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.000 %
Общее количество итераций	i	=	159

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ϵ_x	=	-0.000168
Кривизна вокруг оси Y	$1/r_y$	=	0.007121 1/м
Кривизна вокруг оси Z	$1/r_z$	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A_t	=	160.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A_c	=	317.5 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D_{xx}	=	424226 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D_{yy}	=	6697 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D_{zz}	=	3862 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D_{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y_c	=	40.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z_c	=	222.93 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY_c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ_c	=	22.34 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,max}$	=	0.001384
Минимальная относительная деформация в бетоне	$\epsilon_{b,min}$	=	-0.001037
Максимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,max}$	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	$\sigma_{b,min}$	=	-8.89 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	$\sigma_{b,m}$	=	-6.51 МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

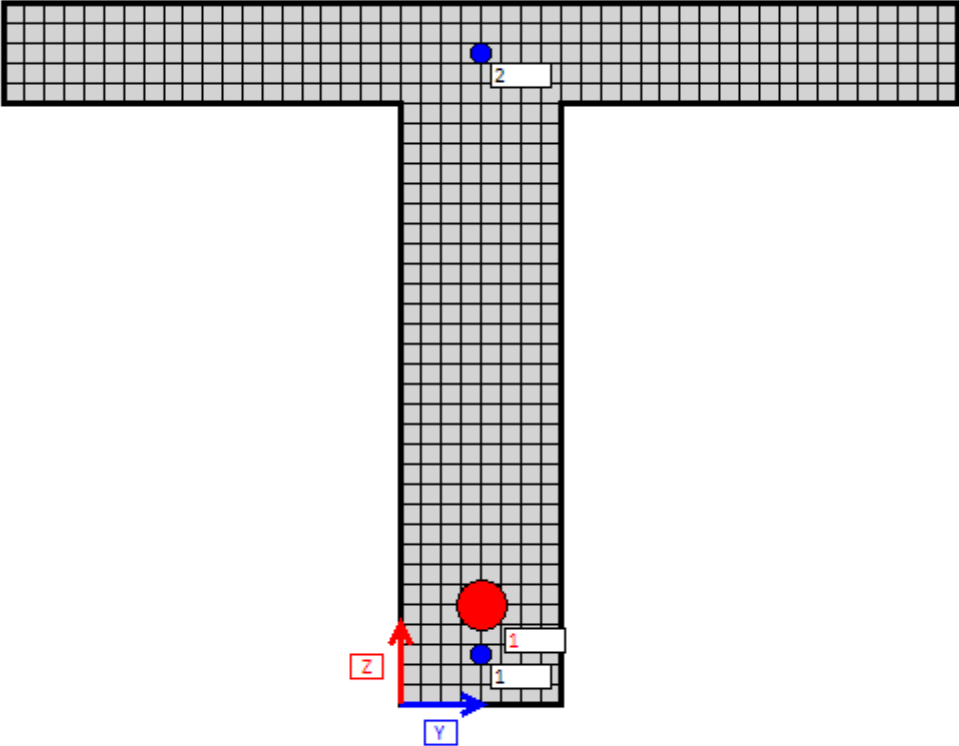
Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,max}$	=	0.001242
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{s,min}$	=	-0.000895
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,max}$	=	296.61 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{s,min}$	=	-178.92 МПа

ПАРАМЕТРЫ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

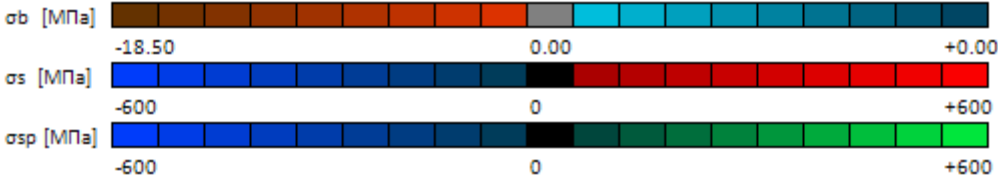
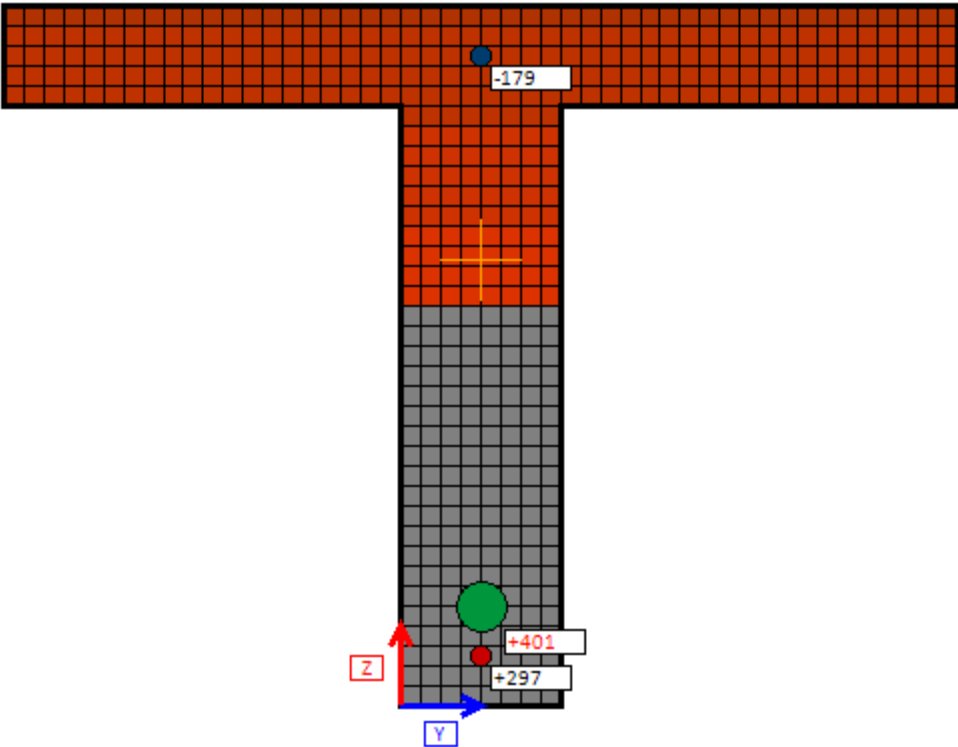
Максимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{sp,max}$	=	0.001064
Минимальная относительная деформация в арматуре	$\epsilon_{sp,min}$	=	0.001064
Максимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{sp,max}$	=	401.30 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	$\sigma_{sp,min}$	=	401.30 МПа

РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.216
Коэффициент использования ненапрягаемой арматуры	k_s	=	0.083
Коэффициент упругой работы ненапрягаемой арматуры	$k_{s,el}$	=	0.494
Коэффициент использования напрягаемой арматуры	k_{sp}	=	0.071
Коэффициент упругой работы напрягаемой арматуры	$k_{sp,el}$	=	0.249



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

Задача 2.5: Диаграммы – криволинейные

НЕЛИНЕЙНАЯ ДЕФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ – ДЛИТЕЛЬНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ

ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

[1] СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Осн. положения
 [2] Автоматизированные методы расчета массивных ж.б. конструкций
 при объемном напряженном состоянии (методическое пособие)

СЕЧЕНИЕ

Тип сечения		=	тавровое
Ширина ребра сечения	b	=	80 мм
Полная высота сечения	h	=	350 мм
Ширина полки сечения	bf	=	475 мм
Высота полки сечения	hf	=	50 мм

ПАРАМЕТРЫ

Способ решения		=	итеративный
Характеристика ползучести бетона по [2]	φ	=	2.524
Работа бетона между трещинами (ψ_s)		=	да

БЕТОН

Класс бетона по прочности на сжатие		=	B25
Диаграмма состояния бетона		=	криволинейная
Коэффициент влияния градиентов деформаций	γ_{btq}	=	0.976
Расчетное сопротивление бетона осевому сжатию	$R_{bc,ser}$	=	18.50 МПа
Расчетное сопротивление бетона осевому растяжению	$R_{bt,ser}$	=	1.55 МПа
Коэффициент условий работы сжатого бетона	γ_{bc}	=	1.000
Коэффициент условий работы растянутого бетона	γ_{bt}	=	1.000
Начальный модуль упругости бетона	E_b	=	30000 МПа

НЕНАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{s,ser}$	=	600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_s	=	1.000
Модуль упругости арматуры	E_s	=	200000 МПа

НАПРЯГАЕМАЯ АРМАТУРА

Класс арматуры по прочности на растяжение		=	A600
Диаграмма состояния арматуры		=	криволинейная
Расчетное сопротивление арматуры растяжению	$R_{sp,ser}$	=	600 МПа
Коэффициент условий работы арматуры	γ_{sp}	=	1.000
Модуль упругости арматуры	E_{sp}	=	200000 МПа
Предварительное напряжение	σ_{sp}	=	145 МПа

СТЕРЖНИ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (2 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	25.0	10.0	40.0	325.0	10.0			

СТЕРЖНИ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ (1 шт.)

Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]	Y [мм]	Z [мм]	d [мм]
40.0	50.0	25.0						

ВНЕШНИЕ УСИЛИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	60.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м

УСИЛИЯ ОТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АРМАТУРЫ
ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ НЕНАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Продольная сила	N _p	=	-71.2 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _{p, y}	=	-12.52 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _{p, z}	=	0.00 кН·м

ИТЕРАЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ УСИЛИЯ

Продольное усилие	N	=	0.0 кН
Изгибающий момент вокруг оси Y	M _y	=	60.00 кН·м
Изгибающий момент вокруг оси Z	M _z	=	0.00 кН·м
Итерационная точность	δ	=	0.031 %
Общее количество итераций	i	=	253

ДЕФОРМАЦИИ В ЦЕНТРЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Осевая относительная деформация	ε _x	=	-0.000174
Кривизна вокруг оси Y	1/r _y	=	0.007331 1/м
Кривизна вокруг оси Z	1/r _z	=	0.000000 1/м
Площадь растянутой зоны сечения	A _t	=	144.0 см ²
Площадь сжатой зоны сечения	A _c	=	333.5 см ²

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ

Осевая жесткость	D _{xx}	=	409338 кН
Изгибная жесткость вокруг оси Y	D _{yy}	=	6715 кН·м ²
Изгибная жесткость вокруг оси Z	D _{zz}	=	3075 кН·м ²
Жесткость относительно осей YZ	D _{yz}	=	0 кН·м ²
Координата центра жесткости по оси Y	Y _c	=	40.00 мм
Координата центра жесткости по оси Z	Z _c	=	201.38 мм
Смещение центра жесткости по оси Y	ΔY _c	=	0.00 мм
Смещение центра жесткости по оси Z	ΔZ _c	=	-24.47 мм

ПАРАМЕТРЫ БЕТОНА НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Максимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b, max}	=	0.001266
Минимальная относительная деформация в бетоне	ε _{b, min}	=	-0.001227
Максимальное напряжение в бетоне	σ _{b, max}	=	0.00 МПа
Минимальное напряжение в бетоне	σ _{b, min}	=	-8.12 МПа
Среднее напряж. в бетоне в рабочей части сечения	σ _{b, m}	=	-6.20 МПа

ПАРАМЕТРЫ НЕНАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

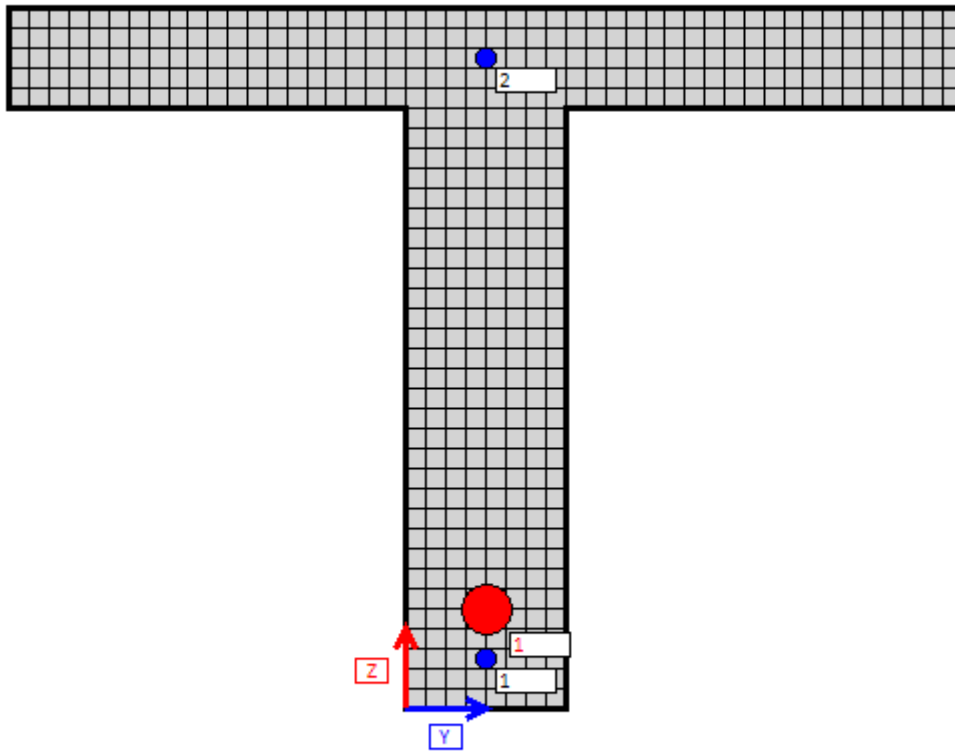
Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s, max}	=	0.001119
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{s, min}	=	-0.001080
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{s, max}	=	297.12 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{s, min}	=	-216.04 МПа

ПАРАМЕТРЫ НАПРЯГАЕМОЙ АРМАТУРЫ НАГРУЖЕННОГО СЕЧЕНИЯ

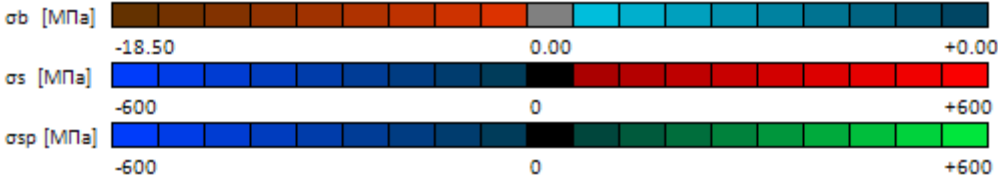
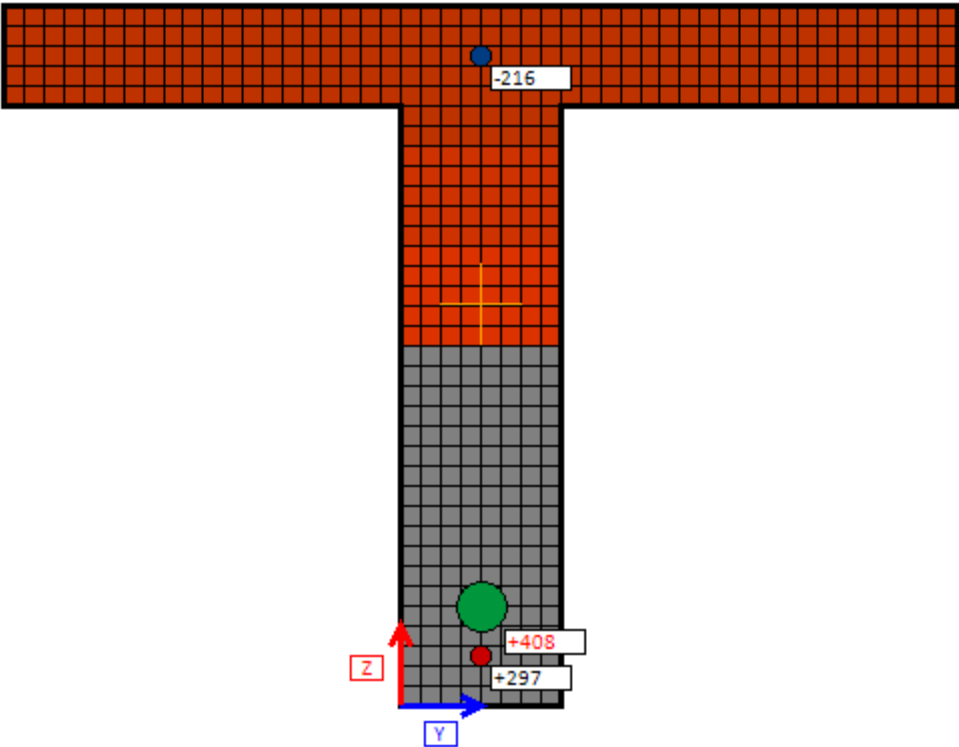
Максимальная относительная деформация в арматуре	ε _{sp, max}	=	0.000936
Минимальная относительная деформация в арматуре	ε _{sp, min}	=	0.000936
Максимальное напряжение в арматуре	σ _{sp, max}	=	407.55 МПа
Минимальное напряжение в арматуре	σ _{sp, min}	=	407.55 МПа

РЕШЕНИЕ

Статус решения		=	найдено
Коэффициент использования сжатого бетона	k_b	=	0.251
Коэффициент использования ненапрягаемой арматуры	k_s	=	0.075
Коэффициент упругой работы ненапрягаемой арматуры	$k_{s,el}$	=	0.495
Коэффициент использования напрягаемой арматуры	k_{sp}	=	0.062
Коэффициент упругой работы напрягаемой арматуры	$k_{sp,el}$	=	0.219



Поперечное сечение элемента



Распределение напряжений по сечению элемента

10 Литература

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изменением № 1) / НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство». М.: Минстрой России, 2018.
2. Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М.: Минстрой России, 2019.
3. Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М.: Минстрой России, 2015.
4. Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций: методическое пособие / ФАУ «ФЦС». М.: Минстрой России, 2015.