



Ассоциация развития  
стального строительства

# РАСЧЁТ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ

ВЕРСИЯ 2.1

РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

## Оглавление

Введение .....	3
1 Описание пользовательского интерфейса. ....	4
1.1 Характеристики бетона.....	5
1.2 Характеристики жёсткой арматуры. ....	6
1.3 Длина колонны. ....	7
1.4 Характеристики гибкой арматуры.....	7
1.5 Редактирование характеристик материалов. ....	10
1.6 Нагрузки. ....	10
1.7 Проверка поперечного сечения колонны.....	11
1.8 Результаты расчёта и отчёт.....	11
2 Расчётные положения. ....	14
2.1 Проверка применимости недеформированной расчётной схемы. 14	
2.2 Определение эксцентриситетов. ....	15
2.3 Граничная относительная высота сжатой зоны.....	16
2.4 Определение предельной силы при внецентренного сжатия относительно оси $Y$ . ....	16
2.5 Определение предельной силы при внецентренного сжатия относительно оси $Z$ .....	19
2.6 Определение предельного значения силы сжатия. ....	19
2.7 Определение коэффициента использования.....	19
2.8 Расчёт процента армирования.....	20
3 Пример отчёта.....	21

## Введение

Программа предназначена для расчёта сталежелезобетонной колонны на действие косого изгиба в соответствии с СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» с Изменением №1 и Изменением №2 (далее СП 266.1325800.2016).

При расчёте колонны используются формулы, рекомендации и данные из нормативных документов:

1. СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования»;
2. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции»;
3. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения»;
4. ГОСТ Р 57837-2017 «Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок»;
5. ГОСТ 27772-2015 «Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия»;
6. СТО АРСС 11251254.001-018-4 «Руководство по проектированию сталежелезобетонных конструкций».

При определении обозначений, в руководстве часто встречается словосочетание “относительно оси”. Это словосочетание эквивалентно словосочетанию в “плоскости перпендикулярной оси”. То есть, определения “изгибающий момент относительно оси  $y$ ” и “изгибающий момент в плоскости перпендикулярной оси  $y$ ” для обозначения  $M_y$  являются эквивалентными.

## 1 Описание пользовательского интерфейса.

Пользовательский интерфейс программы при первом запуске изображён на рисунке 1.

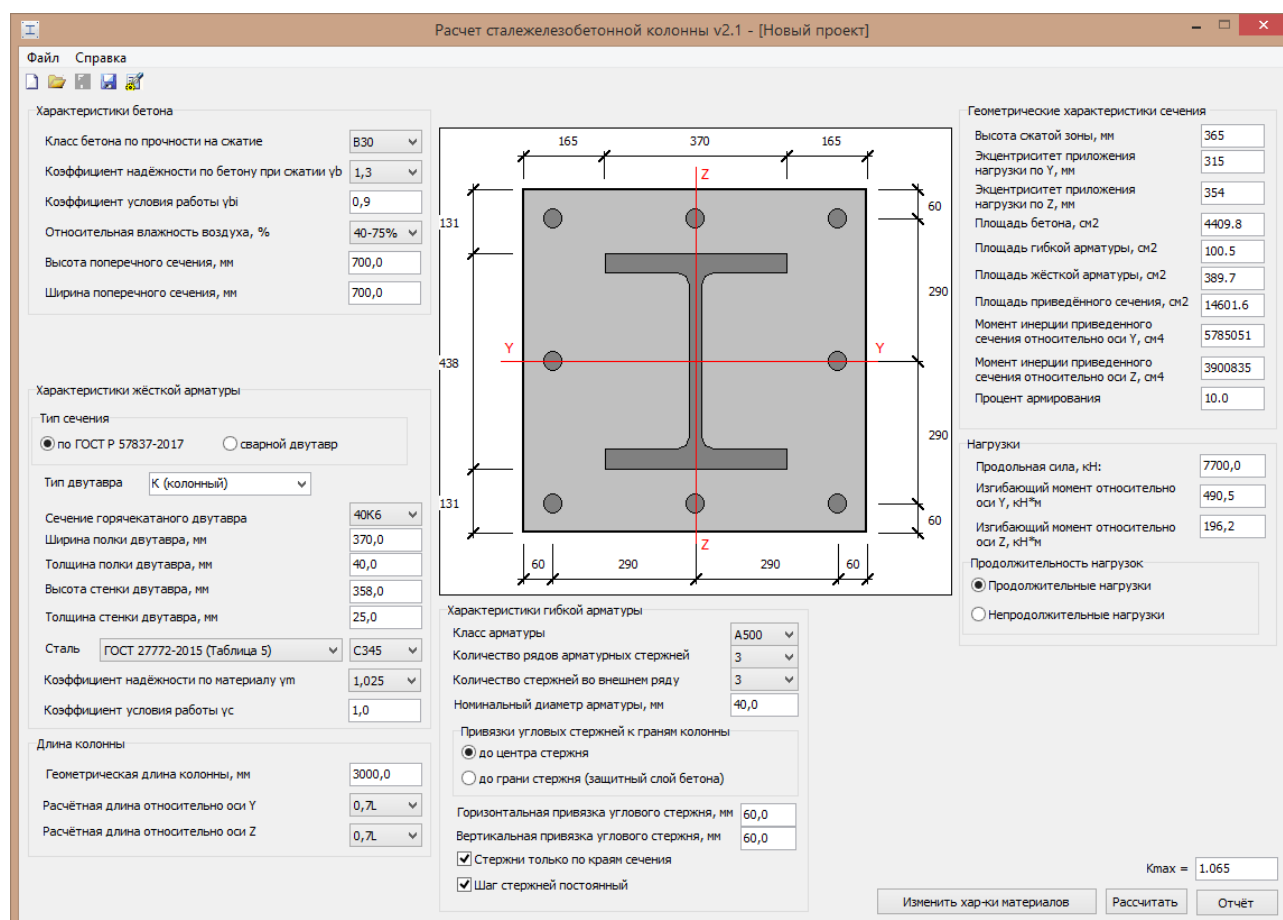


Рис. 1 – Интерфейс программы.

На главном окне программы можно задать все необходимые параметры задачи. Вводимая информация поделена на 5 блоков:

- характеристики бетона;
- характеристики жёсткой арматуры;
- длина колонны;
- характеристики арматуры;
- нагрузки.

Подробные указания по заполнению каждого из этих блоков приводятся в пунктах 1.1 – 1.6 данного руководства.

## 1.1 Характеристики бетона.

Класс бетона по прочности на сжатие выбирается согласно таблице 6.7 [3], но ограничено классами от В10 до В60 включительно. Все характеристики принимаются как для тяжёлого бетона. Нормативное сопротивление бетона осевому сжатию  $R_{bn}$  принимается по той же таблице.

Коэффициент надёжности по бетону при сжатии  $\gamma_b$  выбирается согласно пункту 6.1.11 [3].

Коэффициент условия работы бетона  $\gamma_{bi}$  вводится вручную согласно пункту 6.1.12 [3]. Коэффициент рассчитывается по формуле:

$$\gamma_{bi} = \gamma_{b1} * \gamma_{b2} * \gamma_{b3} * \gamma_{b4} * \gamma_{b5}.$$

При расчёте выполняется проверка, чтобы введённое пользователем значение коэффициента соответствовало требованию:

$$0 < \gamma_{bi} \leq 1.$$

Расчётное сопротивление бетона осевому сжатию  $R_b$  принимается по формуле 6.1 [3] с учётом примечаний из пункта 6.1.12 [3]:

$$R_b = \frac{R_{bn}}{\gamma_b} * \gamma_{bi}$$

Значение начального модуля упругости при сжатии и растяжении  $E_b$  принимается согласно таблице 6.11 [3] как для тяжёлого бетона.

Пользователь выбирает относительную влажность воздуха окружающей среды из трёх вариантов:

- Выше 75%
- 40-75%
- Ниже 40%

Коэффициент ползучести бетона  $\varphi_{b,cr}$  принимается согласно таблице 6.12 [3].

Пользователю предлагается выбрать продолжительность действия нагрузки из двух вариантов (см. пункт 1.5 данного документа). В зависимости от этого выбора рассчитывается значение модуля деформации бетона с учётом длительности действия нагрузки согласно приложению Г [3].

При непродолжительном действии нагрузки применяется формула Г.12 [3]:

$$E_{b1} = 0,85 * E_b$$

При продолжительном действии нагрузки модуль деформации рассчитывается по формуле Г.13 [3]:

$$E_{b1} = E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}}$$

Относительная деформация сжатого бетона  $\varepsilon_{b2}$  принимается согласно пункту 6.1.20 [3]. Пользователь выбирает продолжительность нагрузок, относительную влажность воздуха и класс бетона. По этим параметрам относительная деформация принимается либо 0,0035 (при непродолжительных нагрузках), либо по таблице 6.10 [3] (при продолжительных нагрузках в зависимости от влажности воздуха окружающей среды).

Высота поперечного сечения  $H$  и ширина поперечного сечения  $B$  вводятся вручную. Геометрические параметры колонны указаны на рисунке 2.

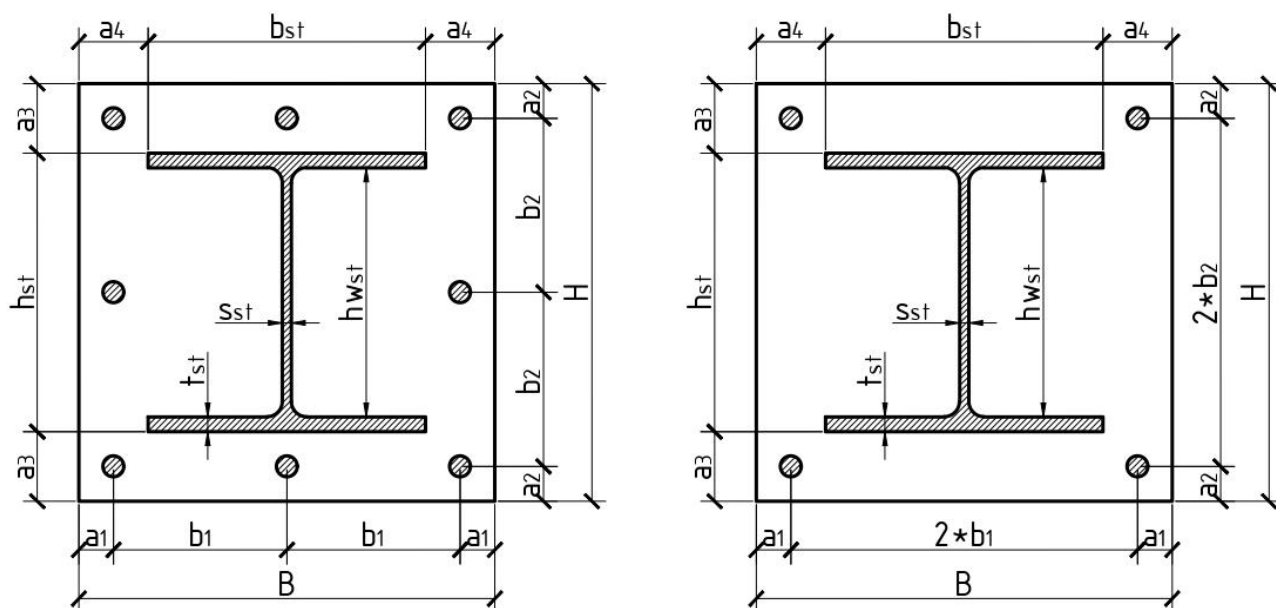


Рис. 2 – Геометрические параметры сечения колонны

## 1.2 Характеристики жёсткой арматуры.

Пользователь выбирает тип сечения горячекатаного двутавра по ГОСТ Р 57837-2017; При выборе можно выбрать любое сечение из таблицы 1 [4]. Все необходимые геометрические характеристики возьмутся из той же таблицы:

- $b_{st}$  – ширина полки двутавра
- $t_{st}$  – толщина полки двутавра
- $h_{wst}$  – высота стенки двутавра
- $s_{st}$  – толщина стенки двутавра
- $h_{st}$  – высота двутавра
- $F_{st}$  – площадь поперечного сечения двутавра
- $I_{z,st}$  – момент инерции в плоскости стенки двутавра
- $I_{y,st}$  – момент инерции в плоскости полок двутавра

Сталь жёсткого сердечника выбирается согласно СП 16.13330.2017 (таблица В.4), ГОСТ 27772-2015 (таблица 5) или ГОСТ Р 57837-2017 (таблица 7). Из толщин  $s_{st}$  и  $t_{st}$  двутавра выбирается наибольшая и характеристики стали принимаются для данной толщины.

Нормативное сопротивление стали  $R_{yn}$ , принимаемое равным значению предела текучести  $\sigma_T$  по национальным стандартам и техническим условиям выбирается из соответствующих таблиц, по которым была выбрана марка стали.

Коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m$  выбирается согласно таблице 3 [2].

Коэффициент условия работы  $\gamma_c$  вводится вручную согласно таблице 1 [2].

Расчётное сопротивление стали по пределу текучести  $R_y$  принимается согласно формуле из таблицы 2 [2]:

$$R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m} * \gamma_c$$

Модуль Юнга, принимаемый для расчёта:  $E_{st} = 206000$  МПа.

### 1.3 Длина колонны.

Пользователь вводит вручную длину колонны  $L$  и коэффициенты расчётной длины согласно пункта 8.1.17 [3].

### 1.4 Характеристики гибкой арматуры.

Пользователь выбирает количество рядов арматуры и количество стержней во внешнем ряду в соответствующих списках. Количество арматурных стержней  $n_s$  также зависит от состояния флажка **Стержни только по краям сечения**. Шаг стержней определяется автоматически.

Пользователь может задать произвольные расстояния между стержнями, отключив флажок Шаг стержней постоянный. При этом справа отображаются таблицы расстояний между рядами арматуры, которые пользователь может редактировать, рис. 3.

**Расчет сталежелезобетонной колонны v2.1 - [Новый проект]**

**Характеристики бетона**

- Класс бетона по прочности на сжатие: B30
- Коэффициент надёжности по бетону при сжатии  $\gamma_b$ : 1,3
- Коэффициент условия работы  $\gamma_{bt}$ : 0,9
- Относительная влажность воздуха, %: 40-75%
- Высота поперечного сечения, мм: 700,0
- Ширина поперечного сечения, мм: 700,0

**Характеристики жёсткой арматуры**

- Тип сечения: ☒ по ГОСТ Р 57837-2017 ☐ сварной двутавр
- Тип двутавра: К (колонный)
- Сечение горячекатаного двутавра: 40К6
- Ширина полки двутавра, мм: 370,0
- Толщина полки двутавра, мм: 40,0
- Высота стенки двутавра, мм: 358,0
- Толщина стенки двутавра, мм: 25,0
- Сталь: ГОСТ 27772-2015 (Таблица 5) C345
- Коэффициент надёжности по материалу  $\gamma_m$ : 1,025
- Коэффициент условия работы  $\gamma_s$ : 1,0

**Длина колонны**

- Геометрическая длина колонны, мм: 3000,0
- Расчётная длина относительно оси Y: 0,7L
- Расчётная длина относительно оси Z: 0,7L

**Характеристики гибкой арматуры**

- Класс арматуры: A500
- Количество рядов арматурных стержней: 6
- Количество стержней во внешнем ряду: 5
- Номинальный диаметр арматуры, мм: 40,0
- Привязка угловых стержней к граням колонны: ☒ до центра стержня ☐ до грани стержня (защитный слой бетона)
- Горизонтальная привязка углового стержня, мм: 60,0
- Вертикальная привязка углового стержня, мм: 60,0
- ☒ Стержни только по краям сечения
- ☐ Шаг стержней постоянный

**Геометрические характеристики сечения**

- Высота сжатой зоны, мм: 365
- Эксцентриситет приложения нагрузки по Y, мм: 315
- Эксцентриситет приложения нагрузки по Z, мм: 354
- Площадь бетона, см<sup>2</sup>: 4409,8
- Площадь гибкой арматуры, см<sup>2</sup>: 100,5
- Площадь жёсткой арматуры, см<sup>2</sup>: 389,7
- Площадь приведённого сечения, см<sup>2</sup>: 14601,6
- Момент инерции приведённого сечения относительно оси Y, см<sup>4</sup>: 5785051
- Момент инерции приведённого сечения относительно оси Z, см<sup>4</sup>: 3900835
- Процент армирования: 10,0

**Нагрузки**

- Продольная сила, кН: 7700,0
- Изгибающий момент относительно оси Y, кН\*м: 490,5
- Изгибающий момент относительно оси Z, кН\*м: 196,2
- Продолжительность нагрузок: ☒ Продолжительные нагрузки ☐ Непродолжительные нагрузки

**Расстояния между рядами арматуры**

- Ряд 1-2: По оси Y: 90,0
- Ряд 1-2: По оси Z: 90,0
- Ряд 2-3: По оси Z: 100,0

**Кнопки:** Изменить хар-ки материалов, Рассчитать, Отчёт

Рис. 3 – Задание матрицы стержней арматуры

Класс арматуры выбирается согласно таблице 6.13 [3], выбор ограничен классами арматуры от A240 до A1000.

Расчётное значение сопротивления растяжению  $R_{s,n}$  принимается по той же таблице.

Коэффициент надёжности по арматуры для предельных состояний первой группы согласно формуле 6.10 [3] всегда принимается равным:

$$\gamma_s = 1.15$$

Расчётное сопротивление арматуры растяжению рассчитывается по формуле 6.10 [3]:

$$R_s = \frac{R_{s,n}}{\gamma_s}$$

Расчётное сопротивление арматуры сжатию  $R_{sc}$  рассчитывается согласно пункту 6.2.8 [3].

Для продолжительных нагрузок:

$$R_{sc} = \min(R_s, 500 \text{ МПа})$$

Для кратковременных нагрузок:

$$R_{sc} = \min(R_s, 400 \text{ МПа})$$

Модуль упругости, принимаемый для расчёта:  $E_s = 200000 \text{ МПа}$



Диаметр арматуры  $d_a$  вводится вручную.

Площадь поперечного сечения одного стержня продольной арматуры рассчитывается по формуле:

$$F_s = \frac{\pi * d_a^2}{4}$$

Момент инерции одного стержня продольной арматуры относительно собственной оси рассчитывается по формуле:

$$I_s = \frac{\pi * d_a^4}{64}$$

Привязки угловых арматурных стержней в горизонтальной плоскости ( $a_1$ ) и вертикальной плоскости ( $a_2$ ) вводятся пользователем вручную. Данные параметры указаны на рисунке 2.

## 1.5 Редактирование характеристик материалов.

В правом нижнем углу окна программы есть кнопка **Изменить хар-ки материалов**, рис. 1, при нажатии на которую открывается окно **Характеристики материалов**, рис. 4.

Характеристики стали жёсткой арматуры		
Расчётное сопротивление стали $R_y$ , МПа:	297,6	<input type="checkbox"/> Редактировать
Модуль упругости стали $E_s$ , МПа	206000,0	<input type="checkbox"/> Редактировать

Характеристики бетона		
Расчётное сопротивления бетона сжатию $R_b$ , МПа:	15,2	<input type="checkbox"/> Редактировать
Относительная деформация бетона $\epsilon_{b2}$ :	0,0048	<input type="checkbox"/> Редактировать
Модуль упругости бетона при сжатии $E_b$ , МПа:	32500,0	<input type="checkbox"/> Редактировать
Модуль деформации бетона $E_{b1}$ , МПа:	9848,5	<input type="checkbox"/> Редактировать

Характеристики стали арматуры		
Расчётное сопротивление стали растяжению $R_s$ , МПа:	434,8	<input type="checkbox"/> Редактировать
Расчётное сопротивление стали сжатию $R_{sc}$ , МПа:	434,8	<input type="checkbox"/> Редактировать
Модуль упругости стали $E_s$ , МПа	200000,0	<input type="checkbox"/> Редактировать

Рис. 4 – Окно Характеристики материалов.

В данном окне отображаются характеристики материалов, которые принимаются для расчёта. Напротив каждой характеристики есть флажок **Редактировать**, при включении которого поле для ввода характеристики становится активным и пользователь может вручную ввести необходимый параметр.

## 1.6 Нагрузки.

Пользователь вручную вводит усилия в элементе:

$M_y$  – момент относительно оси  $Y$

$M_z$  – момент относительно оси  $Z$

$N_x$  – продольная сила

Пользователь указывает, это усилия от непродолжительных нагрузок или от продолжительных.

### 1.7 Проверка поперечного сечения колонны.

Для проверки поперечного сечения колонны рассчитываются дополнительные геометрические параметры:

$$\begin{aligned}b_1 &= 0.5 * B - a_1 \\b_2 &= 0.5 * H - a_2 \\a_3 &= 0.5 * (H - h_{st}) \\a_4 &= 0.5 * (B - b_{st})\end{aligned}$$

Данные параметры отображены на рисунке 2. После их вычисления выполняются проверки сечения согласно таблице 1.

Таблица 1 - Проверки поперечного сечения колонны.

Требование, которое должно выполняться	Ошибка, которая отображается пользователю при невыполнении требования
$a_1 - 0.5 * d_a \geq 15 \text{ мм}$	Толщина защитного слоя бетона менее 15 мм, требуется увеличить параметр $a_1$
$a_2 - 0.5 * d_a \geq 15 \text{ мм}$	Толщина защитного слоя бетона менее 15 мм, требуется увеличить параметр $a_2$
$a_3 - a_2 - 0.5 * d_a \geq 15 \text{ мм}$	Стальной сердечник не помещается в габариты колонны. Требуется уменьшить высоту двутавра $h_s$ или увеличить высоту колонны $H$
$a_4 \geq 15 \text{ мм}$	Толщина защитного слоя бетона менее 15 мм. Требуется уменьшить ширину полки двутавра $b_s$ или увеличить ширину колонны $B$

### 1.8 Результаты расчёта и отчёт.

На главном окне программы отображается схема поперечного сечения колонны, которая прочерчивается автоматически при любых изменениях поперечного сечения. Данное изображение вычерчивается пропорционально и в масштабе. Размерные линии слева и сверху колонны отображают привязки жёсткой арматуры (двутавра), а размерные линии снизу и справа – привязки арматурных стержней.

В нижнем правом углу окна программы расположена кнопка **Рассчитать**, при нажатии на которую происходит расчёт поперечного сечения по заданным исходным данным.

Рис. 5 – Интерфейс программы после выполнения расчёта

После расчёта, если он выполнен успешно, в нижнем правом углу отобразится коэффициент использования поперечного сечения  $k_{max}$  согласно формуле, приведённой в введении в данное руководство.

Кроме этого, станут активными все кнопки, с помощью которых можно посмотреть отчёт расчёта (в правом нижнем углу главного окна программы, в главном меню программы во вкладке «Файл» и на основной панели инструментов программы вверху окна). При нажатии на любую из этих кнопок отобразится отчёт, рис. 6.

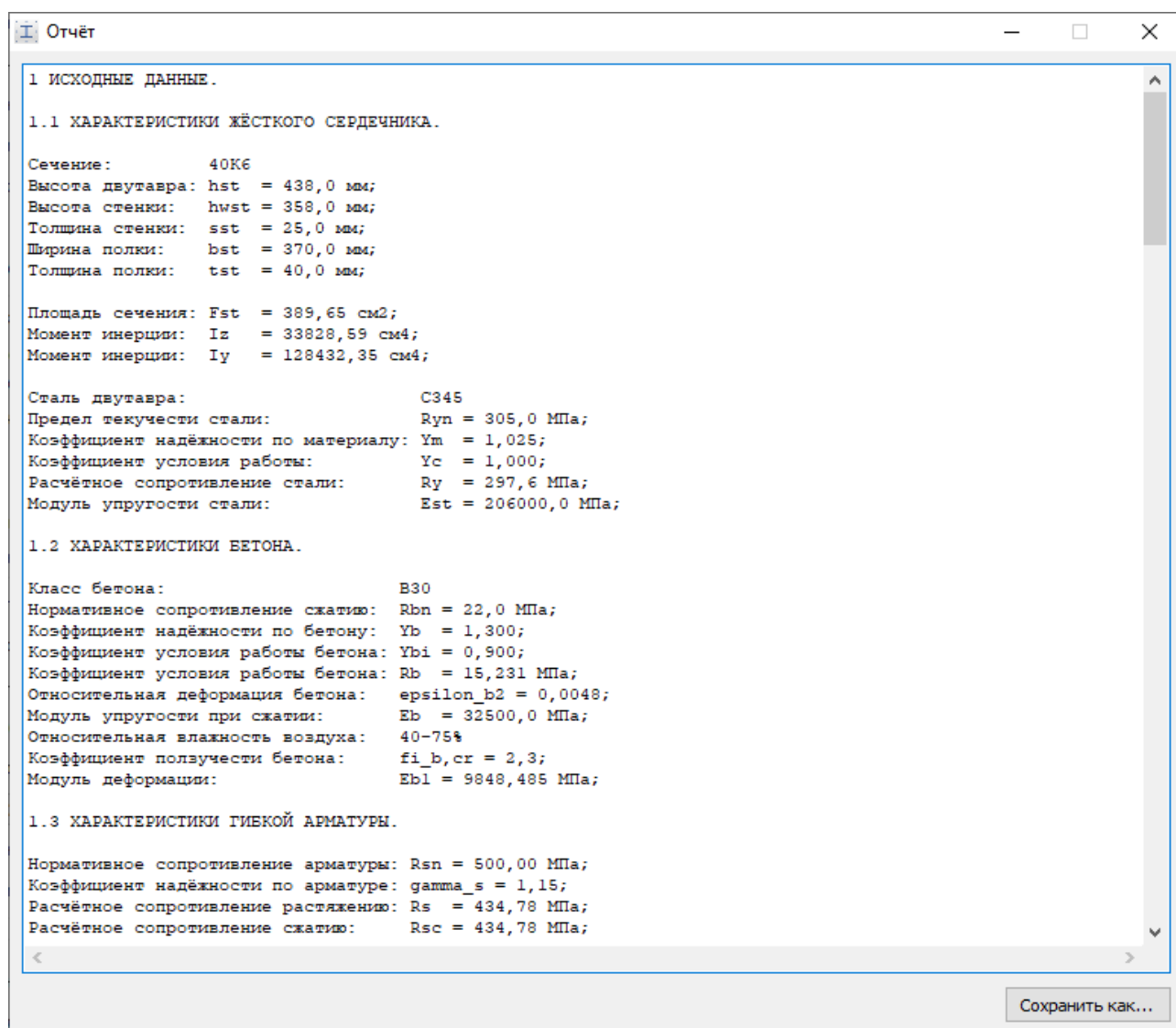


Рис. 6 – Отчёт расчёта.

В данном окне можно посмотреть отчёт, содержащий исходные данные, основные расчётные параметры и коэффициенты использования. При нажатии кнопки **Сохранить как** в правом нижнем углу можно сохранить данный отчёт как текстовый документ формата \*.txt.

Если при расчёте не выполняются условия СП 266.1325800.2016, пункт 7.1.1.3, значит, что расчёт в программе не может быть произведён, поскольку данная программа производит расчёт конструкций только по недеформированной схеме. Коэффициент  $k_{max}$  на главном окне программы не будет отображаться. Однако пользователь сможет открыть отчёт, который будет сгенерирован ровно до этой самой проверки (подробнее см. пункт 2.1 данного руководства).

## 2 Расчётные положения.

### 2.1 Проверка применимости недеформированной расчётной схемы.

Расчёт выполняется согласно требованиям СП 266.1325800.2016, пункт 7.1.1.3.

Коэффициент приведения к бетону для жёсткой арматуры:

$$\alpha_{st} = \frac{E_{st}}{E_{b1}}$$

Коэффициент приведения к бетону для гибкой арматуры:

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_{b1}}$$

Моменты инерции поля стержневой арматуры относительно осей  $Y$  и  $Z$  приведённого сечения:

$$I_{y,s} = n_s * I_s + (0.5 * n_s + 2) * F_s * b_2^2$$

$$I_{z,s} = n_s * I_s + (0.5 * n_s + 2) * F_s * b_1^2$$

Моменты инерции бетонной части относительно осей  $Y$  и  $Z$  :

$$I_{y,b} = \frac{B * H^3}{12} - I_{y,st} - I_{y,s}$$

$$I_{z,b} = \frac{H * B^3}{12} - I_{z,st} - I_{z,s}$$

Моменты инерции приведённого сечения относительно осей  $Y$  и  $Z$  :

$$I_{y,red} = I_{y,b} + I_{y,st} * \alpha_{st} + I_{y,s} * \alpha_s$$

$$I_{z,red} = I_{z,b} + I_{z,st} * \alpha_{st} + I_{z,s} * \alpha_s$$

Площадь приведённого поперечного сечения элемента:

$$A_{red} = (B * H - n_s * F_s - F_{st}) + n_s * F_s * \alpha_s + F_{st} * \alpha_{st}$$

Радиусы инерции приведённого сечения относительно осей  $Y$  и  $Z$  :

$$i_{y,red} = \sqrt{\frac{I_{y,red}}{A_{red}}}$$

$$i_{z,red} = \sqrt{\frac{I_{z,red}}{A_{red}}}$$

Расчётные длины элемента относительно осей  $Y$  и  $Z$  :

$$l_{0,y} = \mu_y * L$$

$$l_{0,z} = \mu_z * L$$

Проверяются условия:

$$\frac{l_{0,y}}{i_{y,red}} \leq 14$$

$$\frac{l_{0,z}}{i_{z,red}} \leq 14$$

В плоскости, в которой условие выполняется, производится расчёт без учёта влияния прогибов колонны на изгибающие моменты. В противоположном случае с учётом влияния прогибов колонны.

Учёт влияния прогибов колонны производится посредством коэффициентов  $\eta_y > 1$  и  $\eta_z > 1$  входящих в формулы по расчёту эксцентриситетов приложения продольной силы  $e_{1,y}$  и  $e_{1,z}$

Коэффициенты  $\eta_y$  и  $\eta_z$  определяется согласно СП 266.1325800.2016 (пункт 7.1.2.5):

$$\eta_y = \frac{1}{1 - \frac{N_x}{N_{cr,y}}}$$

$$\eta_z = \frac{1}{1 - \frac{N_x}{N_{cr,z}}}$$

Условные критические силы  $N_{cr,y}$  и  $N_{cr,z}$  относительно осей  $Y$  и  $Z$ :

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot D_y}{l_0^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot D_z}{l_0^2}$$

Изгибные жёсткость  $D_y$  и  $D_z$  определяется согласно СП 266.1325800.2016 (пункт Г.2).

## 2.2 Определение эксцентриситетов.

Случайные эксцентриситеты в плоскости осей  $Y$  и  $Z$  определяются согласно СП 266.1325800.2016 (пункт 7.1.1.5):

$$e_{a,y} = \max\left(\frac{L}{600}, \frac{B}{30}, 10 \text{ мм}\right)$$

$$e_{a,z} = \max\left(\frac{L}{600}, \frac{H}{30}, 10 \text{ мм}\right)$$

Эксцентриситеты продольной силы в плоскости осей  $Y$  и  $Z$ :

$$e_{0,y} = \max\left(\frac{M_z}{N_x}, e_{a,y}\right)$$

$$e_{0,z} = \max\left(\frac{M_y}{N_x}, e_{a,z}\right)$$

Эксцентриситеты приложения продольной силы относительно центра тяжести сечения растянутого или наименее сжатого (про полностью сжатом сечении) стержня гибкой арматуры с учётом случайного эксцентриситета и влияния изгиба согласно СП 266.1325800.2016 (пункт 7.1.2.4):

$$\begin{aligned} e_{1,y} &= e_{0,y} * \eta_z + b_1 \\ e_{1,z} &= e_{0,z} * \eta_y + b_2 \end{aligned}$$

### 2.3 Граничная относительная высота сжатой зоны.

Относительная деформация сжатого бетона при напряжениях, равных  $R_s$ , определяется по СП 63.13330.2018 (пункт 8.1.6):

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s}; \quad \varepsilon_{s,el} = \frac{R_y}{E_{st}}$$

Граничная относительная высота сжатой зоны определяется по СП 63.13330.2018 (пункт 8.1.6):

$$\xi_R = \frac{0.8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}}$$

Граничная относительная высота сжатой зоны определяется дважды: для стального сердечника:

$$\xi_{R,st} = \frac{0.8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}} = \frac{0.8}{1 + \frac{R_y}{E_{st} * \varepsilon_{b2}}}$$

для стержневой арматуры:

$$\xi_{R,s} = \frac{0.8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}} = \frac{0.8}{1 + \frac{R_s}{E_s * \varepsilon_{b2}}}$$

В качестве рабочего значения принимаем меньшее, как наиболее опасное:

$$\xi_R = \min \begin{cases} \xi_{R,st} \\ \xi_{R,s} \end{cases}$$

### 2.4 Определение предельной силы при внецентренного сжатия относительно оси Y.

Определение высоты сжатой зоны сечения рассчитывается методом последовательных приближений из условия равновесия, формула 7.2 [1] .



Изначально высота сжатой зоны принимается равной  $x_z = 0$  мм. Затем она постепенно наращивается на 0,01 мм.

Для каждой итерации цикла при заданном значении  $x_z$  рассчитываются следующие переменные:

ASstr – площадь растянутой гибкой арматуры

AScom – площадь сжатой гибкой арматуры

ASTstr – площадь растянутой жёсткой арматуры

ASTcom – площадь сжатой жёсткой арматуры

ABcom – площадь сжатого бетона

a\_str – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до растянутой грани сечения (или наименее сжатой)

Ni – предельная продольная сила, которую может воспринять сжатая зона.

Предельная продольная сила рассчитывается по формуле 7.2 [1]:

$$Ni = R_b * ABcom + R_y * (ASTcom - ASTstr) + R_{sc} * AScom - R_s * ASstr;$$

Как только выполняется условие  $Ni \geq N_x$  (заданное значение продольной силы), высота сжатой зоны считается найденной.

Высота сжатой зоны принимается равной  $x_z$ , при которой выполнилось условие.

Рабочая высота сечения:

$$h_0 = H - a_{str}$$

Относительная высота сжатой зоны:

$$\xi = \frac{x_z}{h_0}$$

Проверяем условие:

$$\xi < \xi_R$$

Если условие выполняется, то принимаем к дальнейшему расчёту текущее значения  $x_z$ . Если условие не выполняется, то высота сжатой зоны пересчитывается другим способом по формуле 4.7 [6] с помощью второго цикла.

Изначально предполагаемая высота сжатой зоны принимается равной  $x_i = 0$  мм. Затем она постепенно наращивается на 0,01 мм до тех пор, пока не достигнет значения, равного высоте сечения  $H$  мм.

Для каждой итерации цикла при текущем значении  $x_i$  рассчитываются следующие характеристики:

ASstr – площадь растянутой гибкой арматуры

AScom – площадь сжатой гибкой арматуры

$A_{STstr}$  – площадь растянутой жёсткой арматуры  
 $A_{STcom}$  – площадь сжатой жёсткой арматуры  
 $A_{Bcom}$  – площадь сжатого бетона  
 $a_{str}$  – расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до растянутой грани сечения (или наименее сжатой)  
 $h_0$  – рабочая высота сечения  
 $x_z$  – высота сжатой зоны  
 $delta$  – разница (по модулю) между предполагаемой высотой сжатой зоны  $x_i$  и рассчитанной высотой сжатой зоны  $x_z$ .

Высота сжатой зоны  $x_z$  рассчитывается согласно формуле 4.7 [6]. После того, как цикл рассчитал данные характеристики для всех возможных значений  $0 \text{ мм} \leq x_i \leq H \text{ мм}$  с шагом  $0.01 \text{ мм}$ , программа запоминает, при каком значении  $x_i$  образовалась наименьшая  $delta = |x_i - x_z|$ . И по результатам расчёта принимает за высоту сжатой зоны  $x_z$ , при котором была наименьшая  $delta$ .

Следует отметить, что при расчёте высоты сжатой зоны (любым способом), если нейтральная ось проходит по сечению какого-либо стержня гибкой арматуры, то такой стержень не учитывается в работе и считается, что на его месте находится бетон. Потому что гибкий стержень не может работать на изгиб, он должен быть либо полностью сжат, либо полностью растянут. Для жёсткой арматуры таких допущений нет. Стенка или полка никогда не исключается из работы в запас прочности.

Теперь, когда определено положение нейтральной оси  $x_z$ , рассчитывается предельный момент, который может быть воспринят сечением элемента, относительно наиболее растянутого стержня гибкой арматуры по формуле 7.1 [1]:

$$M_{ymax} = R_b * S_b + \sum R_y * A_{st,i} * z_{st,i} + \sum R_{s,j} * A_{s,j} * z_{s,j},$$

$S_b$  – статический момент площади сечения сжатой зоны бетона относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения растянутого или наименее сжатого (при полностью сжатом сечении) стержня гибкой арматуры параллельно прямой, ограничивающей сжатую зону;

$R_y, A_{st,i}$  – расчетное сопротивление и площадь сечения  $i$ -го участка сечения жесткой арматуры;

$z_{st,i}$  – расстояние от центра тяжести сечения  $i$ -го участка жесткой арматуры до рассматриваемой оси;

$R_{s,j}$ ,  $A_{s,j}$  – расчетное сопротивление и площадь сечения  $j$ -го стержня гибкой арматуры;

$z_{s,j}$  – расстояние от центра тяжести сечения  $j$ -го стержня гибкой арматуры до рассматриваемой оси;

В формуле в правой части условия слагаемые  $R_y * A_{st,i} * z_{st,i}$  для растянутой части жесткой арматуры и  $R_{s,j} * A_{s,j} * z_{s,j}$  для растянутых стержней гибкой арматуры принимаются со знаком «минус».

В формуле опущены коэффициенты условия работы  $\gamma_b$ ,  $\gamma_c$  и  $\gamma_s$ , поскольку все они уже учитывались при расчёте расчётных сопротивлений материалов.

Предельная силы при внецентренного сжатия относительно оси  $Y$  рассчитывается по формуле:

$$N_y = \frac{M_{y\max}}{e_{1,z}}$$

## **2.5 Определение предельной силы при внецентренного сжатия относительно оси $Z$ .**

Расчёт производится аналогично пункту 2.4.. Предельная силы при внецентренного сжатия относительно оси  $Z$  рассчитывается по формуле:

$$N_z = \frac{M_{z\max}}{e_{1,y}}$$

## **2.6 Определение предельного значения силы сжатия.**

Предельное значение силы сжатия, рассчитывается по формуле 7.4 [1]:

$$N_{ult} = \frac{1}{\varphi} * (R_b * A_b + R_{sc} * A_{s,tot} + R_y * A_{st}),$$

$A_b$  – площадь бетонного сечения;

$A_{s,tot}$  – общая площадь гибкой арматуры;

$A_{st}$  – площадь жёсткой арматуры;

$\varphi$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от гибкости элемента.

## **2.7 Определение коэффициента использования**

Программа выполняет проверку поперечного сечения колонны по прочности на внецентренное сжатие согласно пункта 7.1.2 [1] по формуле 7.3 [1]:

$$N \leq [N] = \frac{1}{\frac{1}{N_y} + \frac{1}{N_z} - \frac{1}{N_{ult}}}.$$

Даже если пользователь вводит один из моментов равным нулевому, программа рассчитывает сечение на кривой изгиб, учитывая случайный эксцентриситет в обеих плоскостях. Результат расчёта представляется в виде коэффициента использования:

$$k_{max} = \frac{N}{[N]}.$$

Прочность поперечного сечения колонны считается обеспеченной при выполнении условия:

$$k_{max} < 1.0$$

## 2.8 Расчёт процента армирования

Расчёт процента армирования выполняется по формуле:

$$\mu = \frac{A_{s,tot} + A_{st}}{A} * 100\%$$

$A$  – площадь поперечного сечения.

Площадь поперечного сечения определяется по формуле:

$$A = B \cdot H$$

$B$  – ширина поперечного сечения;

$H$  – высота поперечного сечения.

### 3 Пример отчёта.

#### 1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.

##### 1.1 ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖЁСТКОЙ АРМАТУРЫ.

Сечение: 40К6  
Высота двутавра:  $h_{st} = 438.0$  мм;  
Высота стенки:  $h_{wst} = 358.0$  мм;  
Толщина стенки:  $s_{st} = 25.0$  мм;  
Ширина полки:  $b_{st} = 370.0$  мм;  
Толщина полки:  $t_{st} = 40.0$  мм;  
  
Площадь сечения:  $F_{st} = 389.65$  см<sup>2</sup>;  
Момент инерции относительно оси Y:  $I_y = 128432.35$  см<sup>4</sup>;  
Момент инерции относительно оси Z:  $I_z = 33828.59$  см<sup>4</sup>;  
  
Сталь двутавра: С345  
Предел текучести стали:  $R_{yn} = 305.0$  МПа;  
Коэффициент надёжности по материалу:  $Y_m = 1.025$ ;  
Коэффициент условия работы:  $Y_c = 1.000$ ;  
Расчётное сопротивление стали:  $R_y = 297.6$  МПа;  
Модуль упругости стали:  $E_{st} = 206000.0$  МПа;

##### 1.2 ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА.

Класс бетона: В30  
Нормативное сопротивление сжатию:  $R_{bn} = 22.0$  МПа;  
Коэффициент надёжности по бетону:  $Y_b = 1.300$ ;  
Коэффициент условия работы бетона:  $Y_{bi} = 0.900$ ;  
Коэффициент условия работы бетона:  $R_b = 15.231$  МПа;  
Относительная деформация бетона:  $\epsilon_{b2} = 0.0048$ ;  
Модуль упругости при сжатии:  $E_b = 32500.0$  МПа;  
Относительная влажность воздуха: 40-75%  
Коэффициент ползучести бетона:  $f_{i_b,cr} = 2.3$ ;  
Модуль деформации:  $E_{b1} = 9848.485$  МПа;

##### 1.3 ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБКОЙ АРМАТУРЫ.

Нормативное сопротивление арматуры:  $R_{sn} = 500.00$  МПа;  
Коэффициент надёжности по арматуре:  $\gamma_s = 1.15$ ;  
Расчётное сопротивление растяжению:  $R_s = 434.78$  МПа;  
Расчётное сопротивление сжатию:  $R_{sc} = 434.78$  МПа;  
Модуль упругости:  $E_s = 200000.0$  МПа;  
Диаметр арматурного стержня:  $d_a = 40.0$  мм;  
Площадь сечения стержня:  $F_s = 1256.64$  мм<sup>2</sup>;  
Момент инерции стержня:  $I_s = 12.57$  см<sup>4</sup>;

##### 1.4 НАГРУЗКИ.

Воздействие нагрузок: продолжительное;  
Нормальная сила:  $N_x = 7700.0$  кН;  
Изгибающий момент относительно оси Y:  $M_y = 490.5$  кН\*м;  
Изгибающий момент относительно оси Z:  $M_z = 196.2$  кН\*м;

##### 1.5 ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОЛОННЫ.

Высота поперечного сечения колонны:  $H = 700.0$  мм;  
Ширина поперечного сечения колонны:  $B = 700.0$  мм;  
  
Горизонтальное расстояние от грани колонны  
до центра тяжести углового стержня арматуры:  $a_1 = 60.0$  мм;

Вертикальное расстояние от грани колонны  
до центра тяжести углового стержня арматуры:  $a_2 = 60.0$  мм;  
Количество рядов арматурных стержней:  $n_{row} = 6$ ;  
Количество стержней во внешнем ряду:  $n_{col} = 5$ ;  
Шаг стержней по горизонтали:  $step1 = 145.0$  мм;  
Шаг стержней по вертикали:  $step2 = 116.0$  мм;  
Общее количество арматурных стержней:  $ns = 18$ ;

Центр тяжести двутаврового сечения жёсткой арматуры  
совпадает с центром тяжести бетона

Расчётная длина относительно оси Y:  $L_y = 2100.0$  мм;  
Расчётная длина относительно оси Z:  $L_z = 2100.0$  мм;

## 2 УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ПРОГИБОВ КОЛОННЫ НА ИЗГИБАЮЩИЕ МОМЕНТЫ.

Коэффициент приведения к бетону:  
- для жёсткой арматуры:  $\alpha_{st} = 20.92$ ;  
- для гибкой арматуры:  $\alpha_s = 20.31$ ;

Момент инерции всей стержневой арматуры:  
- относительно оси Y:  $I_{ys} = 131042.11$  см<sup>4</sup>;  
- относительно оси Z:  $I_{zs} = 147152.20$  см<sup>4</sup>;

Момент инерции бетонной части:  
- относительно оси Y:  $I_{yb} = 1741358.87$  см<sup>4</sup>;  
- относительно оси Z:  $I_{zb} = 1819852.55$  см<sup>4</sup>;

Момент инерции приведённого сечения относительно его центра тяжести:  
- относительно оси Y:  $I_{y,red} = 7088931.32$  см<sup>4</sup>;  
- относительно оси Z:  $I_{z,red} = 5515764.11$  см<sup>4</sup>;

Площадь приведённого сечения элемента:  $A_{red} = 17027.93$  см<sup>2</sup>;

Радиус инерции приведённого сечения:  
- относительно оси Y:  $i_{y,red} = 204.04$  мм;  
- относительно оси Z:  $i_{z,red} = 179.98$  мм;

Условие жёсткости колонны относительно оси Y:  $L_{oy} / i_{y,red} = 10.29 \leq 14$  - выполнено  
Коэффициент учёта влияния прогибов относительно оси Y:  $\eta_{ay} = 1.00$

Условие жёсткости колонны относительно оси Z:  $L_{oz} / i_{z,red} = 11.67 \leq 14$  - выполнено  
Коэффициент учёта влияния прогибов относительно оси Z:  $\eta_{az} = 1.00$

## 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОВ.

Расчёт производится по формулам СП 266.1325800.2016, пункт 7.1.2.4.  
Эксцентриситеты приложения продольной силы относительно  
центра тяжести сечения растянутого стержня гибкой арматуры  
с учётом случайного эксцентриситета и влияния изгиба:  
- плоскость XOY:  $e_{1,y} = 315.48$  мм;  
- плоскость XOZ:  $e_{1,z} = 353.70$  мм;

## 4 ГРАНИЧНАЯ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ВЫСОТА СЖАТОЙ ЗОНЫ.

Расчёт производится по формулам СП 63.13330.2018, пункт 8.1.6.  
Для жёсткой арматуры:  $\xi_{st} = 0.615$ ;  
Для стержневой арматуры:  $\xi_s = 0.551$ ;  
Рабочее значение (минимальное):  $\xi_R = 0.551$ ;

## 5 РАСЧЁТ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ Y.

Расчёт высоты сжатой зоны сечения по СП 266.1325800.2016, формула 7.2.  
Высота сжатой зоны сечения:  $x_z = 470.01$  мм;

Расстояние от центра тяжести растянутой арматуры  
до растянутой грани сечения:  $a_1 = 124.698$  мм;  
Рабочая высота сечения:  $h_0 = 575.302$  мм;

Площади растянутых сечений:  
- жёсткая арматура:  $16274.750$  мм<sup>2</sup>;  
- гибкая арматура:  $8796.459$  мм<sup>2</sup>;

Площади сжатых сечений:  
- жёсткая арматура:  $22275.250$  мм<sup>2</sup>;  
- гибкая арматура:  $13823.007$  мм<sup>2</sup>;  
- бетон:  $292908.743$  мм<sup>2</sup>;

$xz/h_0 = 0.82 \leq \xi_R = 0.55$  - условие не выполняется;

Расчёт высоты сжатой зоны сечения по СТО АРСС 11251254.001-018-4, формула 4.7.  
Принятая высота сжатой зоны сечения:  $\xi = 350.99$  мм;  
Полученная высота сжатой зоны сечения:  $xz = 350.98$  мм;  
Разница между принятой и полученной величиной:  $\delta = 0.01$  мм;  
Расстояние от центра тяжести растянутой арматуры  
до растянутой грани сечения:  $a_1 = 151.268$  мм;  
Рабочая высота сечения:  $h_0 = 548.732$  мм;

Площади растянутых сечений:  
- жёсткая арматура:  $19250.500$  мм<sup>2</sup>;  
- гибкая арматура:  $11309.733$  мм<sup>2</sup>;

Площади сжатых сечений:  
- жёсткая арматура:  $19299.500$  мм<sup>2</sup>;  
- гибкая арматура:  $11309.733$  мм<sup>2</sup>;  
- бетон:  $215076.767$  мм<sup>2</sup>;

Центр тяжести сжатого бетона относительно наиболее  
сжатой точки поперечного сечения:  $a_2 = 178.188$  мм;

Расчёт предельной продольной силы по СП 266.1325800.2016, формула 7.1.  
Предельный момент:  $M_{u\_max} = 5748.22$  кН\*м;  
Предельная продольная сила:  $N_{u\_max} = 16251.63$  кН;

6 РАСЧЁТ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ Z.

Расчёт высоты сжатой зоны сечения по СП 266.1325800.2016, формула 7.2.  
Высота сжатой зоны сечения:  $x_u = 370.01$  мм;  
Расстояние от центра тяжести растянутой арматуры  
до растянутой грани сечения:  $a_1 = 160.590$  мм;  
Рабочая высота сечения:  $h_0 = 539.410$  мм;

Площади растянутых сечений:  
- жёсткая арматура:  $13199.200$  мм<sup>2</sup>;  
- гибкая арматура:  $10053.096$  мм<sup>2</sup>;

Площади сжатых сечений:  
- жёсткая арматура:  $25350.800$  мм<sup>2</sup>;  
- гибкая арматура:  $12566.370$  мм<sup>2</sup>;  
- бетон:  $221089.830$  мм<sup>2</sup>;

$x_u/h_0 = 0.69 \leq \xi_R = 0.55$  - условие не выполняется;

Расчёт высоты сжатой зоны сечения по СТО АРСС 11251254.001-018-4, формула 4.7.  
Принятая высота сжатой зоны сечения:  $\xi = 346.33$  мм;  
Полученная высота сжатой зоны сечения:  $x_u = 346.33$  мм;  
Разница между принятой и полученной величиной:  $\delta = 0.00$  мм;  
Расстояние от центра тяжести растянутой арматуры  
до растянутой грани сечения:  $a_1 = 200.367$  мм;

Рабочая высота сечения:  $h_0 = 499.633 \text{ мм};$

Площади растянутых сечений:

- жёсткая арматура:  $20886.840 \text{ мм}^2;$
- гибкая арматура:  $10053.096 \text{ мм}^2;$

Площади сжатых сечений:

- жёсткая арматура:  $17663.160 \text{ мм}^2;$
- гибкая арматура:  $10053.096 \text{ мм}^2;$
- бетон:  $214707.744 \text{ мм}^2;$

Центр тяжести сжатого бетона относительно наиболее сжатой точки поперечного сечения:  $a_2 = 169.351 \text{ мм};$

Расчёт предельной продольной силы по СП 266.1325800.2016, формула 7.1.

Предельный момент:  $M_{z\_max} = 4429.42 \text{ кН*м};$

Предельная продольная сила:  $N_{z\_max} = 14040.24 \text{ кН};$

7 ПРЕДЕЛЬНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ СИЛА, КОТОРАЯ МОЖЕТ БЫТЬ ВОСПРИНЯТА ЭЛЕМЕНТОМ.

Расчёт предельной продольной силы по СП 266.1325800.2016, формула 7.4.

Коэффициент  $\phi_i$ :  $\phi_i = 0.920;$

Предельная продольная сила:  $N_{ult} = 30384.905 \text{ кН};$

Площадь бетонного сечения:  $A_b = 4284.155 \text{ см}^2;$

Площадь жёсткой арматуры:  $A_{st} = 389.650 \text{ см}^2;$

Общая площадь гибкой арматуры:  $A_{s,tot} = 226.195 \text{ см}^2;$

8 РАСЧЁТ ПО ПРОЧНОСТИ НА ДЕЙСТВИЕ КОСОГО ИЗГИБА.

Проверка поперечного сечения колонны по СП 266.1325800.2016, формула 7.3.

Критическая продольная сила:  $N_{cr} = 10015.521 \text{ кН};$

Действующая продольная сила:  $N_x = 7700.000 \text{ кН};$

Коэффициент использования:  $k_{max} = 0.769;$

ВЫВОД: прочность поперечного сечения колонны обеспечена.