

## РАСЧЕТ НЕСУЩЕГО СТАЛЬНОГО КАРКАСА ЗДАНИЯ ТОРГОВОГО ЦЕНТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ETABS 2016

**Баранчик А.В., Баранчик В.Г.**

ETABS – интегрированный программный комплекс для расчета и проектирования зданий и сооружений. Система трехмерного статического и динамического анализа методом конечного элемента и проектирование сооружений.

Аналитические возможности ETABS – представляют самые последние достижения в числовых методах и алгоритмах решения. CSI ETABS в режиме нелинейного анализа (изменение во времени), использует новую числовую методику интеграции, идентифицированную, как метод Вильсона FNA (Быстрый Нелинейный Анализ). Процедура использует итерационный векторный алгоритм наложения (суперпозиции), который является чрезвычайно эффективным для анализа структур с предопределенными ограниченными нелинейностями. Графическое отображение результатов сделано легко, включая анимации смещений элементов в режиме реального времени.

Расчет несущего остова здания выполнен на основе пространственной расчетной схемы с использованием программного комплекса ETABS 2016. Данный комплекс позволил выполнить расчет конструктивной системы здания, проверить обеспечивается ли требуемая жесткость и устойчивость здания при действии заданных нагрузок, определить нагрузки на фундамент и основание.

В принятой расчетной модели несущего каркаса здания элементы несущего каркаса представлены стержневыми элементами общего вида. В расчетную модель включены только несущие элементы здания – колонны, балки, прогоны, связи (см. рисунок 1). Наличие прочих элементов учтено посредством соответствующих нагрузок.

Все элементы расчетной модели шарнирно сопряжены между собой.

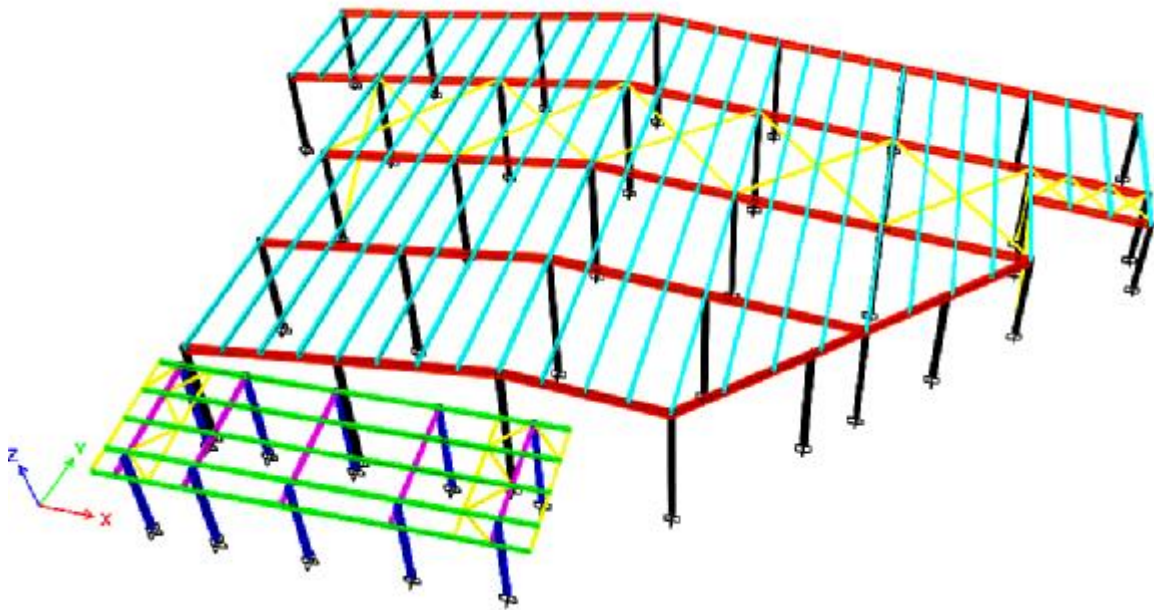
Закрепление по низу колонн – жесткое (моделируется жесткое сопряжение с фундаментом).

Жесткость каркаса в любом направлении обеспечивается жестким сопряжением несущих колонн с фундаментом.

При сборе нагрузок определены нормативные значения с использованием:

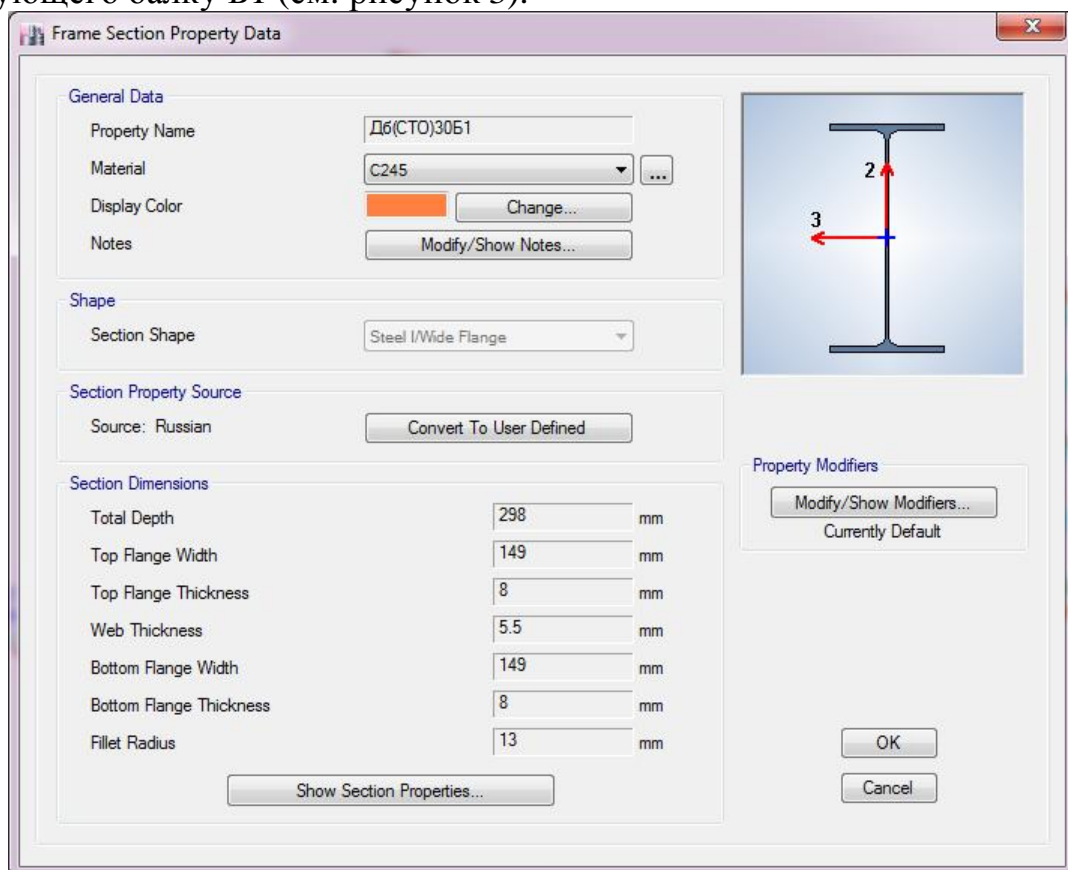
- 1) ТКП EN 1991-1-1-2016 – постоянные нагрузки;
- 2) ТКП EN 1991-1-3-2009 "Воздействия на конструкции. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки";
- 3) ТКП EN 1991-1-4-2009 "Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия".

Численные значения частных коэффициентов приняты по ТКП EN 1990-2011\*



**Рисунок 1 – Вид в аксонометрии конечно-элементной модели**

Рассмотрим назначение свойств на примере конечного элемента (КЭ) моделирующего балку Б1 (см. рисунок 3).



**Рисунок 2 – Основные свойства КЭ, моделирующего балку Б1**

### **Нагрузки и воздействия на КЭ модель.**

#### *Постоянные нагрузки.*

Вес кровли: Тип 1 (оси Г-К) с учетом заданных данных составил  $G_{r1}=83.57$  кг/м<sup>2</sup>; Тип 2 (Оси А-В) с учетом заданных данных составил  $G_{r2}=8.20$  кг/м<sup>2</sup>.

Нагрузка от собственного веса стены составила  $G_{f1}=32.70$  кг/м<sup>2</sup>.

### Снеговые нагрузки.

Снеговая равномерно распределенная нагрузка по ТКП EN 1991-1-3-2009 "Воздействия на конструкции. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки". С учетом национального приложения и изменений №1 и №2.

Объект расположен в снеговом районе 1В (таблица НП.1 п.4.1(1) изм.2).

По таблице НП.1 по 4.1(1) изм.2 определяем характеристическое значение снеговой нагрузки на грунт  $s_k$ , где  $A=138.8$  м:

$$s_k = 1.35 + 0.38 \times (138.8 - 140) / 100 = 1.345 \text{ кПа.}$$

В расчетной модели заданы следующие случаи формы снеговых нагрузок для каркаса в осях А-Б (Покрытия здания, примыкающего к более высокому сооружению):

С учетом случаев получаем значения для величины снеговой нагрузки:

$$S_1 = \mu_1 \times C_e \times C_t \times s_k = 0.8 \times 1 \times 1 \times 1.345 = 1.08 \text{ кПа;}$$

$$S_2 = \mu_2 \times C_e \times C_t \times s_k = 2.74 \times 1 \times 1 \times 1.345 = 3.69 \text{ кПа.}$$

### Ветровые нагрузки.

Ветровое воздействие определено по ТКП EN 1991-1-4-2009 "Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия". С учетом национального приложения и изменений №1 и №2.

Программный комплекс ETABS 2016 позволяет в автоматическом режиме задать ветровое воздействие используя следующие исходные данные:

Section	Parameter	Value
Exposure and Pressure Coefficients	Exposure from Extents of Diaphragms	<input type="radio"/>
	Exposure from Shell Objects	<input checked="" type="radio"/>
Wind Exposure Parameters	Windward Coefficient, Cp	<input type="text"/>
	Leeward Coefficient, Cp	<input type="text"/>
Wind Coefficients	Wind Velocity, Vb (m/s)	21
	Terrain Category	III
	Orography Factor, Co(z)	1
	Turbulence Factor, k1	1
	Structural Factor, CsCd	1
	Air Density, Rho (kg/m <sup>3</sup> )	1.25
Exposure Height	Top Story	Story1
	Bottom Story	Base
	Include Parapet	<input type="checkbox"/>
Parapet Height		<input type="text"/> m

Рисунок 3 – Таблица для ввода данных ветровых нагрузок

где  $V_b=21$  м/с – по изм. 2 ТКП EN 1991-1-4-2009 таблица НП.1 п.4.2(1)Р и рис.НП.1;

Terrain Category – тип местности = III / IV (для фасада в осях 1-9 / для остальных фасадов) – по п.4.3.2ТКП EN 1991-1-4-2009 таблица 4.1;

$Co(z) = 1$  – по п.4.3.3 ТКП EN 1991-1-4-2009;  
 $k_1 = 1$  – по п.4.4 ТКП EN 1991-1-4-2009;  
 $CsCd = 1$  – раздел 6 ТКП EN 1991-1-4-2009.  
 $Rho = \rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$  –плотность воздуха п.4.5 (примеч. 2) ТКП EN 1991-1-4-2009.

### Сочетания нагрузок

Согласно п.6.1 ТКП EN 1990-2011\* для выбранных расчетных ситуаций и значимых предельных состояний отдельные воздействие для выявления критических случаев нагружения следует объединять в сочетания. Согласно п.6.4.3. 1 ТКП EN 1990-2011\* для каждого критического случая нагружения расчетные значения эффектов воздействий следует определять, применяя сочетания воздействий, которые рассматриваются как действующие одновременно.

Согласно п.6.4.3.2 ТКП EN 1990-2011\* общая форма записи эффектов воздействий для основного сочетания имеет следующий вид:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

При расчете в программном комплексе ETABS 2016 использовались следующие виды загрузений

Загружения задаваемые в расчетном комплексе ETABS 2016 приведены в таблице 1 с указанием коэффициентов  $\gamma$  согласно национальному приложению к техническому кодексу установившейся практики ТКП EN 1990-2011 таблица НП.1.

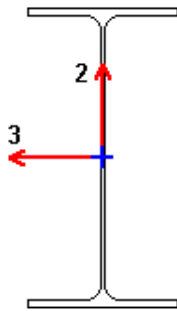
Таблица 1 – Задаваемые загрузкиения

Название	Название, принятое в ETABS 2016	Частный коэф. $\gamma$
Собственный вес металлических конструкций каркаса (учитывается автоматически в ETABS 2016)	Dead	1,35
Собственный конструкций кроме веса каркаса	Sdead	1,35
Ветер по план схеме 1 и 5	WindX01	1,5
Ветер по план схеме 2 и 6	WindX02	1,5
Ветер по план схеме 3 и 7	WindY03	1,5
Ветер по план схеме 4 и 8	WindY04	1,5
Снег случай I	Snow1	1,5
Снег случай II	Snow2	1,5
Снег случай III	Snow3	1,5

После проведения расчета и анализа таблицы сочетания усилий для оценки максимальных горизонтальных перемещений строились изополя перемещений по осям X и Y. Полученные в результате расчёта горизонтальные перемещения элементов каркаса здания не превысили 7 мм.

Вертикальные перемещения и прогибы конструкций покрытия определялись в автоматическом режиме в программном комплексе ETABS 2016. Рассмотрим Результатрасчета для балки Б1.

## Eurocode 3-2005 Steel Section Check (Deflection Envelope)



Element Details

Level	Element	Unique Name	Element Type	Section
Story1	B207	112	DCH MRF	Дб(СТО)30Б1

DEFLECTION DESIGN

Deflection Type	Deflection Value mm	Deflection Limit mm	Deflection Ratio	Load Combo	Station Location mm	Check Status
Total - Camber	13.9	30	0.461	UDStID2	3018.1	OK

Как видно из расчет прогиб для Б1 составил 13,9мм при допустимых 30мм.

### Результаты конечно элементного анализа

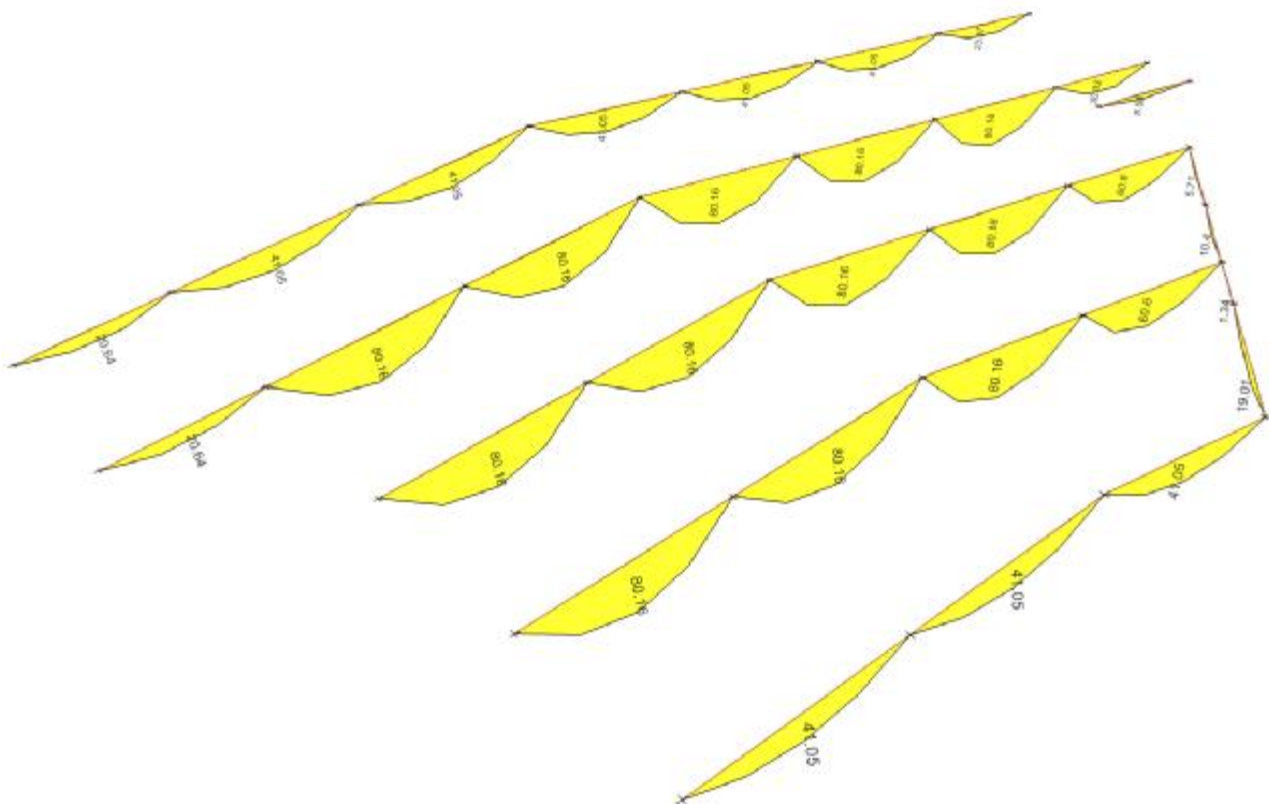


Рисунок 4 – Изгибающие моменты в балках для заданного сочетания

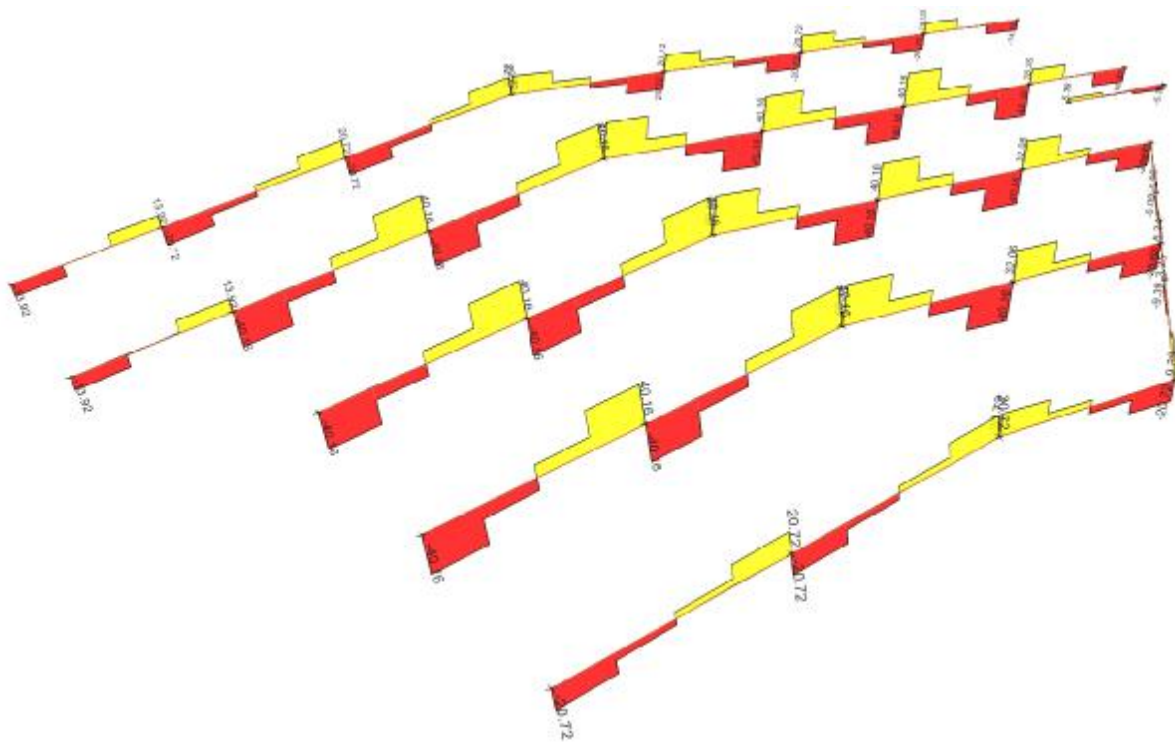


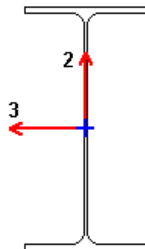
Рисунок 5 – Эпюры поперечных сил в балках для заданного сочетания

## Результаты расчет элементов в ETABS

Каждый элемент каркаса посчитан для наихудших сочетаний воздействий в КЭ.

### Балка Б1

Eurocode 3-2005 Steel Section Check (Strength Summary)



Element Details (Part 1 of 2)

Level	Element	Unique Name	Length (m)	Location (m)	Combo	Design Type	Element Type
Story1	B239	91	6.03619	1.50905	UDStS2	Beam	DCH MRF

Element Details (Part 2 of 2)

Section	Classification	Rolled
Дб(СТО)30Б1	Class 1	Yes

Design Parameters

National Annex	Combination Equation	Analysis Type	Reliability
CEN Default	Eq. 6.10	Method 2 (Annex B)	Class 1

Design Code Parameters

$\gamma_{M0}$	$\gamma_{M1}$	$\gamma_{M2}$	$A_n / A_g$	LLRF	PLLF	Stress ratio Limit
1	1	1.25	1	1	0.75	0.95

### Section Properties

A (cm <sup>2</sup> )	I <sub>yy</sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>yy</sub> (m)	W <sub>el,yy</sub> (cm <sup>3</sup> )	A <sub>v,y</sub> (cm <sup>2</sup> )	W <sub>pl,yy</sub> (cm <sup>3</sup> )	I <sub>yz</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )
41.04	6362.65	0.12451	427.02	19.72	478.32	0	6.69

I <sub>zz</sub> (cm <sup>4</sup> )	i <sub>zz</sub> (m)	W <sub>el,zz</sub> (cm <sup>3</sup> )	A <sub>v,z</sub> (cm <sup>2</sup> )	W <sub>pl,zz</sub> (cm <sup>3</sup> )	I <sub>w</sub> (cm <sup>6</sup> )	h (m)
442.17	0.03282	59.35	25.53	91.94	92732.84	0.298

A <sub>eff</sub> (cm <sup>2</sup> )	e <sub>Ny</sub> (m)	e <sub>Nz</sub> (m)	W <sub>ef,yy</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>ef,zz</sub> (cm <sup>3</sup> )
41.04	0	0	427.02	59.35

### Material Properties

E (kN/m <sup>2</sup> )	f <sub>y</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	f <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> )
206000000	245000	370000

### Stress Check Forces and Moments

Location (m)	N <sub>Ed</sub> (kN)	M <sub>Ed,yy</sub> (kN-m)	M <sub>Ed,zz</sub> (kN-m)	V <sub>Ed,z</sub> (kN)	V <sub>Ed,y</sub> (kN)	T <sub>Ed</sub> (kN-m)
1.50905	-3.96	60.12	-0.03	-39.52	0.02	-7.414E-04

### Demand/Capacity (D/C) Ratio 6.3.3(4)-6.62

$$\text{D/C Ratio} = N_{Ed} / (\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}) + k_{zy} [M_{y,Ed} / (\chi_{LT} M_{y,Rk} / \gamma_{M1})] + k_{zz} [M_{z,Ed} / (M_{z,Rk} / \gamma_{M1})]$$

$$0.732 = 0.004 + 0.726 + 0.001$$

### Basic Factors

Buckling Mode	K Factor	L Factor	L Length (m)	L <sub>cr</sub> / i
Major (y-y)	1	1	6.03619	48.478
Major Braced	1	1	6.03619	48.478
Minor (z-z)	1	0.25	1.50905	45.974
Minor Braced	1	0.25	1.50905	45.974
LTB	1	0.25	1.50905	45.974

### Axial Force Design

	N <sub>Ed</sub> Force kN	N <sub>c,Rd</sub> Capacity kN	N <sub>t,Rd</sub> Capacity kN	N <sub>b,yy,Rd</sub> Major kN	N <sub>b,zz,Rd</sub> Minor kN
Axial	-3.96	1005.48	1005.48	918.99	886.97

N <sub>pl,Rd</sub> kN	N <sub>u,Rd</sub> kN	N <sub>cr,T</sub> kN	N <sub>cr,TF</sub> kN	A <sub>n</sub> / A <sub>g</sub> Unitless
1005.48	1093.31	5313.15	5313.15	1

### Design Parameters for Axial Design

	Curve	α	N <sub>cr</sub> (kN)	λ	Φ	χ	N <sub>bd,Rd</sub> (kN)
Major (y-y)	a	0.21	3550.41	0.532	0.676	0.914	918.99
MajorB (y-y)	a	0.21	3550.41	0.532	0.676	0.914	918.99
Minor (z-z)	b	0.34	3947.78	0.505	0.679	0.882	886.97
MinorB (z-z)	b	0.34	3947.78	0.505	0.679	0.882	886.97
Torsional TF	b	0.34	5313.15	0.435	0.635	0.912	916.93

### Moment Designs

	M <sub>Ed</sub> Moment kN-m	M <sub>Ed,span</sub> Moment kN-m	M <sub>c,Rd</sub> Capacity kN-m	M <sub>v,Rd</sub> kN-m	M <sub>n,Rd</sub> kN-m	M <sub>b,Rd</sub> Capacity kN-m
Major (y-y)	60.12	80.16	117.19	117.19	117.19	110.42
Minor (z-z)	-0.03	-0.03	22.52	22.52	22.52	

### Moment Designs

	Section	Flange	Web	$\varepsilon$ (Unitless)	$\alpha$ (Unitless)	$\psi$ (Unitless)
Compactness	Class 1	Class 1	Class 1	0.979	0.506	-0.992

	Curve	$\alpha_{LT}$	$\lambda_{LT}$	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$	$C_1$	$M_{cr}$ (kN-m)
LTB	a	0.21	0.439	0.621	0.942	1.031	607.97

	$C_{my}$	$C_{mz}$	$C_{mLT}$	$k_{yy}$	$k_{yz}$	$k_{zy}$	$k_{zz}$
Factors	0.9	1	1	0.901	0.601	1	1.002

### Shear Design

	$V_{Ed}$ Force (kN)	$V_{c,Rd}$ Capacity (kN)	$T_{Ed}$ /Torsion (kN-m)	Stress Ratio	Status Check
Major (z)	39.52	278.94	-7.414E-04	0.142	OK
Minor (y)	0.02	361.12	-7.414E-04	5.696E-05	OK

### Shear Design

	$V_{pl,Rd}$ (kN)	$\eta$ (Unitless)	$\lambda_w$ (Unitless)
Reduction	278.94	1.2	0.606

### End Reaction Major Shear Forces

Left End Reaction (kN)	Load Combo	Right End Reaction (kN)	Load Combo
40.16	$V_{et_4}$	40.16	$V_{et_4}$

**Выводы.** Принятая система на основе стального каркаса способна воспринять нагрузки, действующие на здание в процессе его эксплуатации.

Выполненный расчет показал:

- Горизонтальные перемещения здания не превышают 7 мм;
- Вертикальные перемещения здания и прогибы покрытия не превышают предельных значений.

На основании расчета подобраны оптимальные сечения несущих конструкций каркаса здания.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ТКП EN 1991-1-1-2016 "Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-1. Общие воздействия. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий";
2. ТКП EN 1991-1-3-2009 "Воздействия на конструкции. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки";
3. ТКП EN 1991-1-4-2009 "Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия";
4. ТКП EN 1990-2011\*. "Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций";
5. ТКП EN 1993-1-1-2009 "Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий";
6. ТКП EN 1993-1-8-2009 «Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений».