



## 1. Процедура испытаний

1.1. Идентификация изделия:	Наименование, тип, маркировка образцов соответствуют сопроводительной документации
1.2. Отбор образцов:	Произведен в соответствии с ГОСТ Р 58972-2020
1.3. Цель испытаний:	Подтверждение соответствия требованиям НД: ГОСТ 30546.1-98, ГОСТ 30546.2-98, ГОСТ 30546.3-98 (исполнение сейсмостойкости 9 баллов по шкале MSK-64)
1.4. Методика испытаний:	Собственный вес конструкции распределяется между узлами конечно-элементной модели пропорционально примыкающим площадям. Собственный вес оборудования сосредоточен в узлах закрепления (используются конечные элементы «сосредоточенная масса») Напряженно-деформированное состояние несущих конструкций от сейсмического воздействия определено линейно-спектральным методом. Компоненты X, Y, Z в запас прочности складываются по абсолютной величине.
1.5. Условия проведения испытаний:	Подготовка образца к испытаниям и сами испытания проведены при нормальных климатических условиях, по ГОСТ 15150-69

## 2. Заключение

Комплекс подготовки газа «Экс-Форма», выпускаемый по ТУ 28.99.39.190-037-12213528-2022, соответствует:

ГОСТ 30546.1-98, ГОСТ 30546.2-98, ГОСТ 30546.3-98 (исполнение сейсмостойкости 9 баллов по шкале MSK-64).

На основании общности конструкции и применяемых материалов данное испытание можно распространить на станции газораспределительные блочные автоматизированные «Экс-Форма», выпускаемые по ТУ 3696-025-12213528-2009; комплексы подготовки газа «Экс-Форма», выпускаемые по ТУ 28.99.39.190-037-12213528-2022.

Приложение №1

к протоколу № 260-11-23-Д-ВТ



**Испытание на сейсмическое воздействие  
Комплекса подготовки газа «Экс-Форма», выпускаемого  
по ТУ 28.99.39.190-037-12213528-2022**

## Содержание

1. Общие сведения.....	3
2. Нагрузки и воздействия, действующие на КПП .....	3
3. Методика расчета.....	4
4. Расчет КПП .....	7
4.1. Определение собственных частот колебаний КПП .....	8
4.2. Анализ сейсмического воздействия на КПП .....	11
4.3. Визуализация коэффициента запаса прочности от сейсмического воздействия .....	15
5. Общие выводы.....	16

# 1. Общие сведения

Испытание на сейсмическое воздействие комплекса подготовки газа «Экс-Форма», выпускаемого по ТУ 28.99.39.190-037-12213528-2022 (далее КПП), выполнено расчетным методом на основании технической документации, ГОСТ 30546.1-98 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости», ГОСТ 30631-99 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации», СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах».

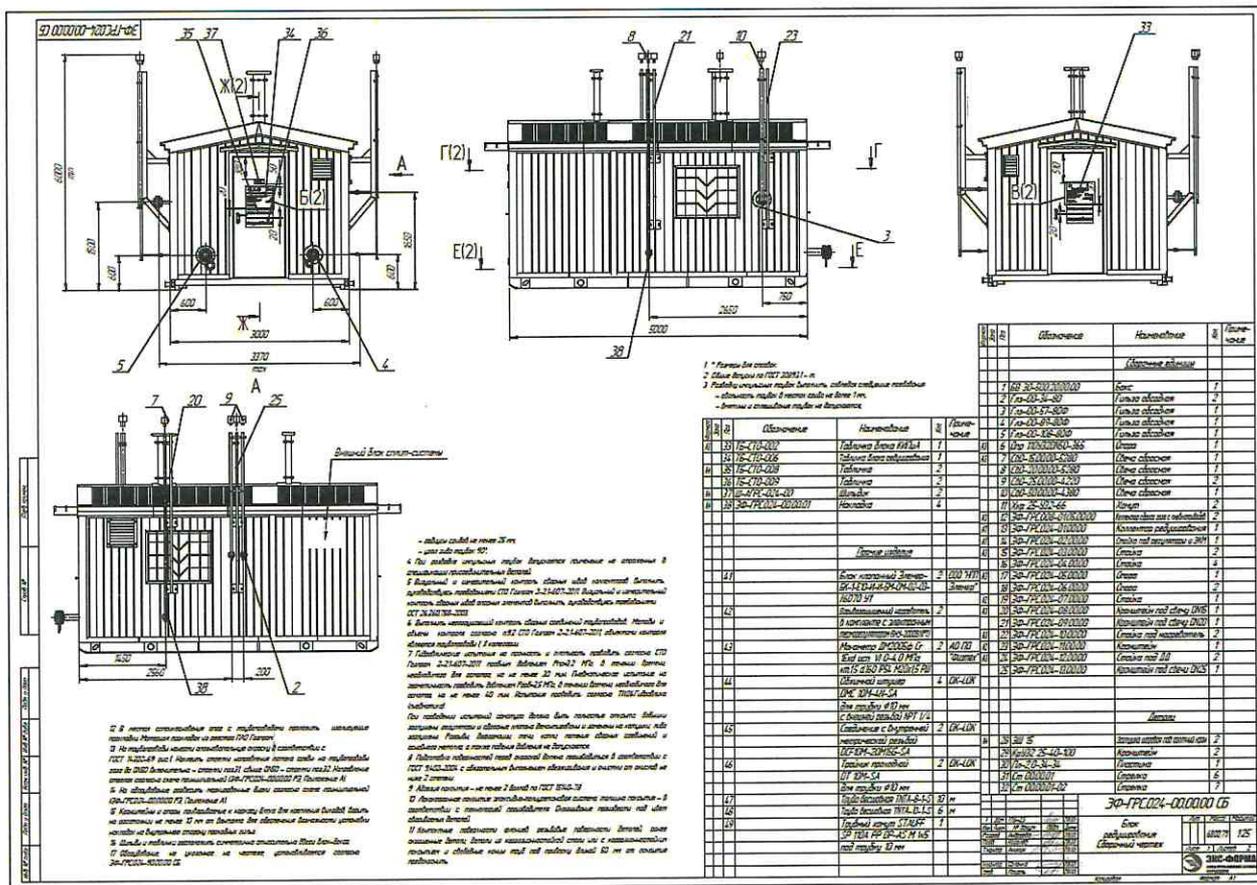


Рис. 1. Общий вид КПП

# 2. Нагрузки и воздействия, действующие на КПП

На основании технической документации, был смоделирован КПП.

В качестве статических и динамических нагрузок были приняты следующие типы нагрузок:

1. собственный вес;
2. сейсмическое воздействие в 9 баллов по шкале MSK-64.

### 3. Методика расчета

Расчет выполнен в ПО ANSYS — универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа. ANSYS аттестован в Ростехнадзоре России (паспорт номер 327 от 18 апреля 2013), ISO 9001 2008.

Расчет, выполняемый программой ANSYS, основан на классических инженерных представлениях и концепциях. При помощи численных методов эти концепции могут быть сформулированы в виде матричных уравнений, которые наиболее пригодны для конечно-элементных приложений.

Совокупность дискретных областей (элементов), связанных между собой в конечном числе точек (узлов), представляет собой математическую модель системы. Основными неизвестными являются степени свободы узлов конечно-элементной модели. К степеням свободы относятся перемещения, повороты, температуры, давления, скорости, потенциалы электрических или магнитных полей; их конкретное содержание определяется типом элемента, который связан с данным узлом. В соответствии со степенями свободы для каждого элемента модели формируются матрицы масс, жесткости (или теплопроводности) и сопротивления (или удельной теплоемкости). Эти матрицы приводят к системам совместных уравнений, которые обрабатываются так называемыми “решателями”.

Для материалов с линейными свойствами напряжения связаны с деформациями соотношением:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon_{el}\}, \quad (1)$$

где  $\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$  – вектор напряжений (как выходная величина помечается меткой S);

[D] – матрица упругости (описывается уравнениями (17)...(22), обратная матрица записывается в виде (3) и (4);

$\{\varepsilon_{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon_{th}\}$  – выходной массив;

$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{xz} \ \varepsilon_{yz}]^T$  – вектор полной (суммарной) деформации;

$\{\varepsilon_{th}\}$  – вектор температурной деформации.

Компоненты вектора напряжений показаны на Рис. 2. Для используемых в программе ANSYS напряжений и деформаций принято следующее правило знаков: величины, относящиеся к растяжению, являются положительными, к сжатию – отрицательными. Компоненты сдвига считаются положительными, если их направления совпадают с направлениями соответствующих координатных осей.

Деформации сдвига представляют собой инженерные деформации, а не компоненты тензора.

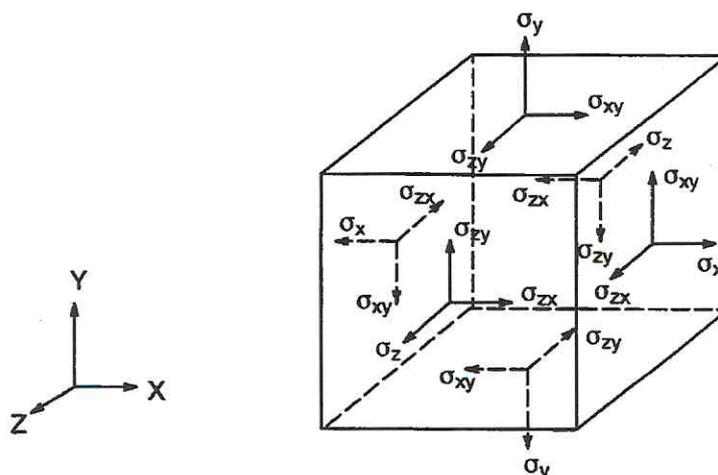


Рис. 2. Компоненты вектора напряжений

Уравнение (1) может быть обращено следующим образом:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma\}. \quad (2)$$

Матрица  $[D]^{-1}$ , нормализованная по столбцам, имеет вид:

$$[D]^{-1} = \begin{vmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_y & -\nu_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_x & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_x & -\nu_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_z \end{vmatrix}. \quad (3)$$

При использовании нормализации по строкам, матрица записывается следующим образом:

$$[D]^{-1} = \begin{vmatrix} 1/E_x & -\nu^*_{xy}/E_y & -\nu^*_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu^*_{yx}/E_x & 1/E_y & -\nu^*_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ -\nu^*_{zx}/E_x & -\nu^*_{zy}/E_y & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{zx} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Для записи элементов этих матриц используются обозначения:

$E_x$  – модуль Юнга в направлении оси  $x$ ,

$\nu_{xy}$  – минимальный коэффициент Пуассона,

$\nu^*_{xy}$  – максимальный коэффициент Пуассона,

$G_{xy}$  – модуль сдвига в плоскости  $x$ - $y$ .

Матрица  $[D]^{-1}$  должна быть положительно определенной. Кроме того, эта матрица должна быть симметричной, поэтому для ортотропных материалов предполагается существование соотношений:

$$v_{yx}/E_x = v_{xy}/E_y, \quad (5)$$

$$v_{zx}/E_x = v_{xz}/E_z, \quad (6)$$

$$v_{zy}/E_y = v_{yz}/E_z, \quad (7)$$

или

$$v^*_{yx}/E_y = v^*_{xy}/E_x, \quad (8)$$

$$v^*_{zx}/E_z = v^*_{xz}/E_x, \quad (9)$$

$$v^*_{zy}/E_z = v^*_{yz}/E_y. \quad (10)$$

Согласно допустимым выше соотношениям, величины  $v_{xy}$ ,  $v_{zy}$ ,  $v_{zx}$ ,  $v^*_{yx}$ ,  $v^*_{zy}$  и  $v^*_{zx}$  являются зависимыми и поэтому не задаются при вводе исходных данных.

Из равенства (2) в развернутом виде, используя выражения (3), а также (5)...(7), получаем шесть уравнений:

$$\varepsilon_x = \alpha_x \Delta T + \sigma_x/E_x - v_{xy} \sigma_y/E_y - v_{xz} \sigma_z/E_z, \quad (11)$$

$$\varepsilon_y = \alpha_y \Delta T + \sigma_y/E_y - v_{xy} \sigma_x/E_x - v_{yz} \sigma_z/E_z, \quad (12)$$

$$\varepsilon_z = \alpha_z \Delta T + \sigma_z/E_z - v_{xz} \sigma_x/E_x - v_{yz} \sigma_y/E_y, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{xy} = \sigma_{xy}/G_{xy}, \quad (14)$$

$$\varepsilon_{yz} = \sigma_{yz}/G_{yz}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_{xz} = \sigma_{xz}/G_{xz}, \quad (16)$$

где  $\varepsilon_x$  – деформация в направлении оси x,

$\varepsilon_{xy}$  – деформация сдвига в плоскости x-y,

$\sigma_x$  – напряжения в направлении оси x,

$\sigma_{xy}$  – напряжения сдвига в плоскости x-y;

Компоненты с другими индексами получаются циклическим сдвигом (x-y-z).

Уравнение (1) можно переписывать в развернутом виде, используя обратную матрицу (3), что вместе с уравнениями (5)...(7) дает шесть соотношений для напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_x = & E_x/h [1 - (v_{yz})^2 E_y/E_z] (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + E_x/h [v_{xy} + \\ & + v_{xz} v_{yz} E_y/E_z] (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + E_x/h [v_{xz} + v_{yz} v_{xy}] (\varepsilon_z - \\ & - \alpha_z \Delta T), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\sigma_y = E_x/h [v_{xy} + v_{xz} v_{yz} E_y/E_z] (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + E_y/h [1 - \quad (18)$$

$$- (v_{xz})^2 * E_x / E_z] (\epsilon_y - \alpha_y * \Delta T) + E_y / h [v_{yz} + v_{xz} * v_{xy} * E_x / E_y] (\epsilon_z - \alpha_z * \Delta T),$$

$$\sigma_z = E_x / h [v_{xz} + v_{yz} * v_{xy}] (\epsilon_x - \alpha_x * \Delta T) + E_y / h [v_{yz} + v_{xz} * v_{xy} * E_x / E_y] (\epsilon_y - \alpha_y * \Delta T) + E_z / h [1 - (v_{xy})^2 * E_x / E_y] (\epsilon_z - \alpha_z * \Delta T), \quad (19)$$

$$\sigma_{xy} = G_{xy} \in_{xy}, \quad (20)$$

$$\sigma_{yz} = G_{yz} \in_{yz}, \quad (21)$$

$$\sigma_{xz} = G_{xz} \in_{xz}, \quad (22)$$

в которых обозначено:

$$h = 1 - (v_{xy})^2 * E_x / E_y - (v_{yz})^2 * E_y / E_z - (v_{xz})^2 * E_x / E_z - 2 v_{xy} * v_{yz} * v_{xz} * E_x / E_z.$$

Если модули сдвига  $G_{xy}$ ,  $G_{yz}$ ,  $G_{xz}$  не задаются при вводе, то их значения вычисляются следующим образом:

$$G_{xy} = (E_x * E_y) / (E_x + E_y + 2 v_{xy} * E_x) \quad (23)$$

$$G_{yz} = G_{xy} \quad (24)$$

$$G_{xz} = G_{xy} \quad (25)$$

## 4. Расчет КПП

Geometry

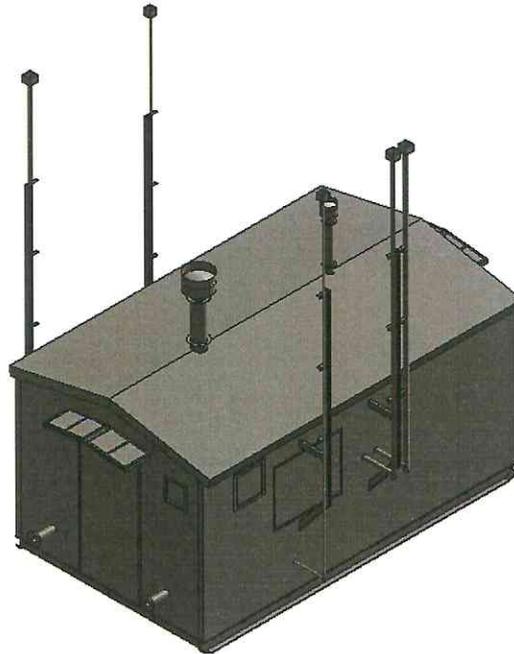


Рис. 3. Расчетная аппроксимированная модель

#### 4.1. Определение собственных частот колебаний КПП

№ Рис.	Форма колебаний	Частота, Гц
5	1	8,5139
6	2	8,7307
7	3	9,4465
8	4	10,128
9	5	10,424
10	6	10,433

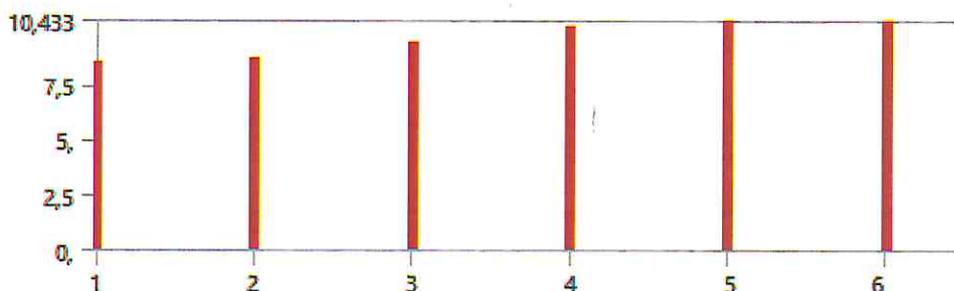


Рис. 4. Гистограмма собственных частот колебаний

B: Modal  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Frequency: 8,5139 Hz  
Unit: m

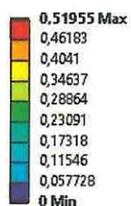


Рис. 5. Амплитуда при 1-й форме колебаний

B: Modal  
Total Deformation 2  
Type: Total Deformation  
Frequency: 8,7307 Hz  
Unit: m

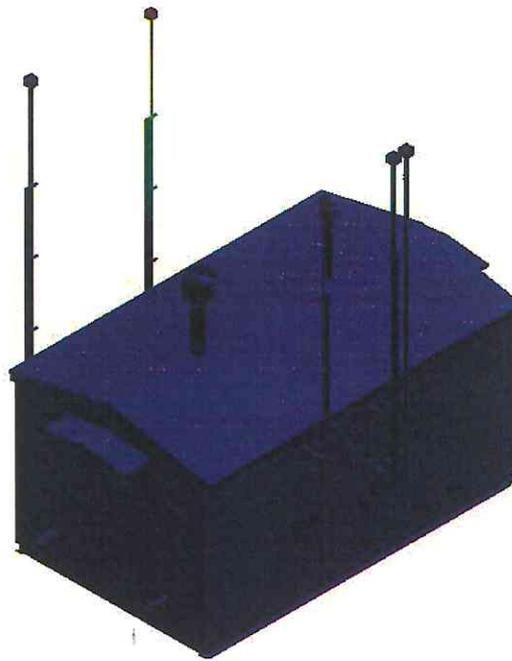
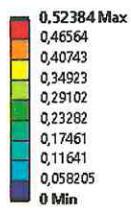


Рис. 6. Амплитуда при 2-й форме колебаний

B: Modal  
Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Frequency: 9,4465 Hz  
Unit: m

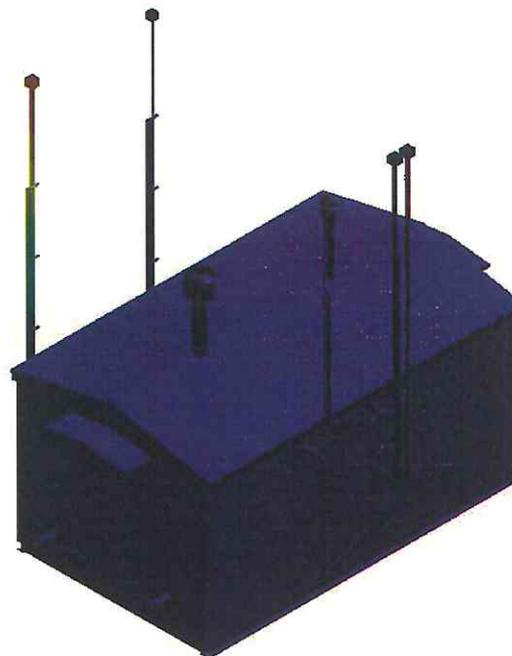
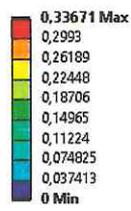


Рис. 7. Амплитуда при 3-й форме колебаний

**B: Modal**  
Total Deformation 4  
Type: Total Deformation  
Frequency: 10,128 Hz  
Unit: m

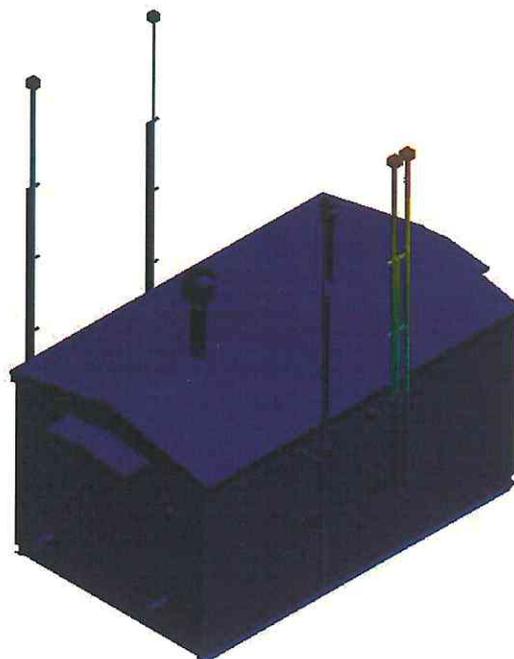
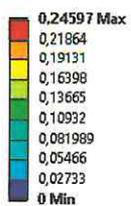


Рис. 8. Амплитуда при 4-й форме колебаний

**B: Modal**  
Total Deformation 5  
Type: Total Deformation  
Frequency: 10,424 Hz  
Unit: m

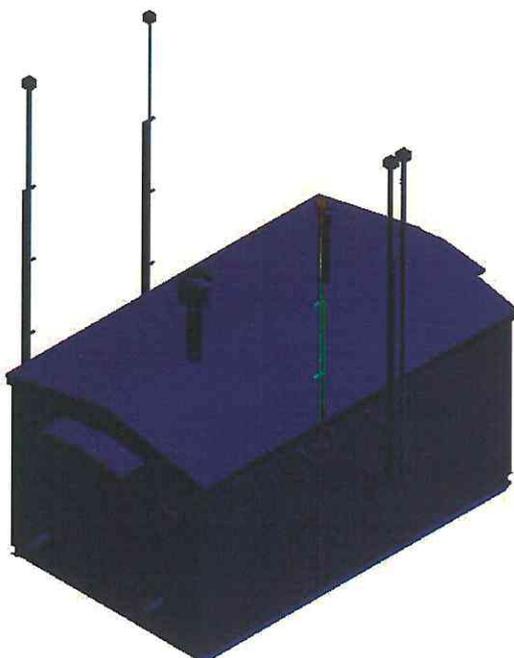
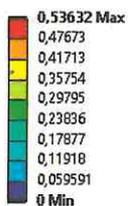


Рис. 9. Амплитуда при 5-й форме колебаний

**B: Modal**  
 Total Deformation 6  
 Type: Total Deformation  
 Frequency: 10,433 Hz  
 Unit: m

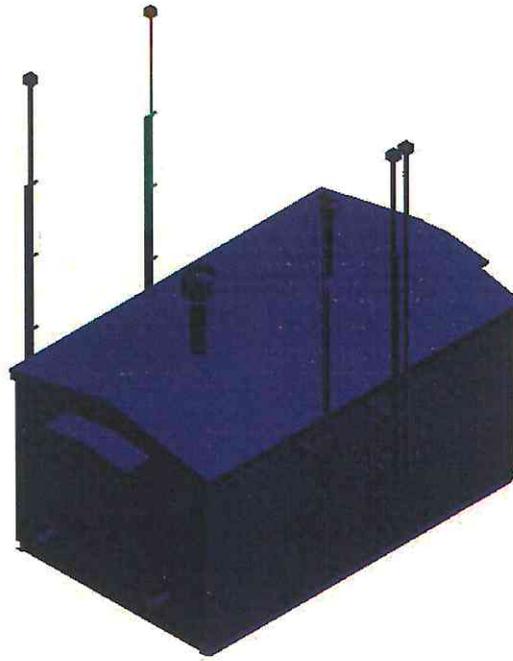
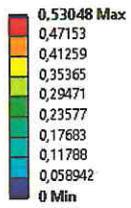


Рис. 10. Амплитуда при 6-й форме колебаний

#### 4.2. Анализ сейсмического воздействия на КППГ

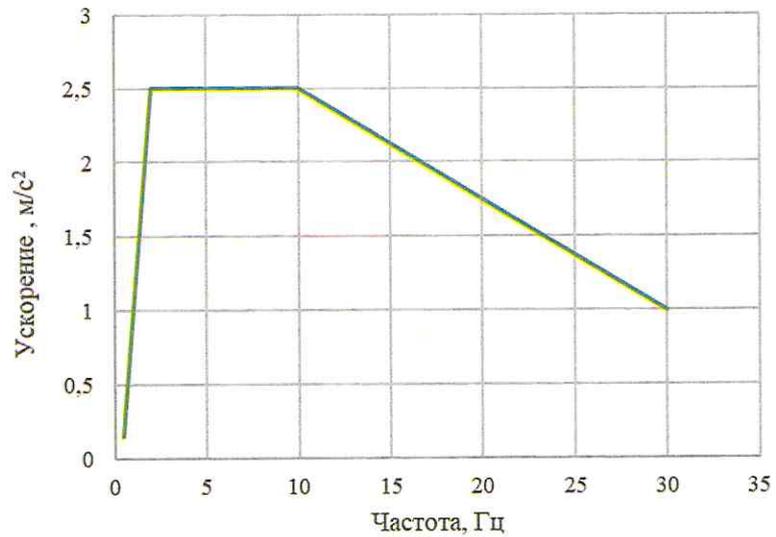


Рис. 11. График зависимости между максимальной амплитудой ускорения и частотой синусоидальной вибрации – расчетный спектр воздействия

Частота, Гц	Ускорение, м/с <sup>2</sup>
0.5	0.15
2.0	2.5
10.0	
30.0	1.0

C: Response Spectrum  
Directional Deformation  
Type: Directional Deformation(X Axis)  
Unit: m  
Solution Coordinate System  
Time: 0

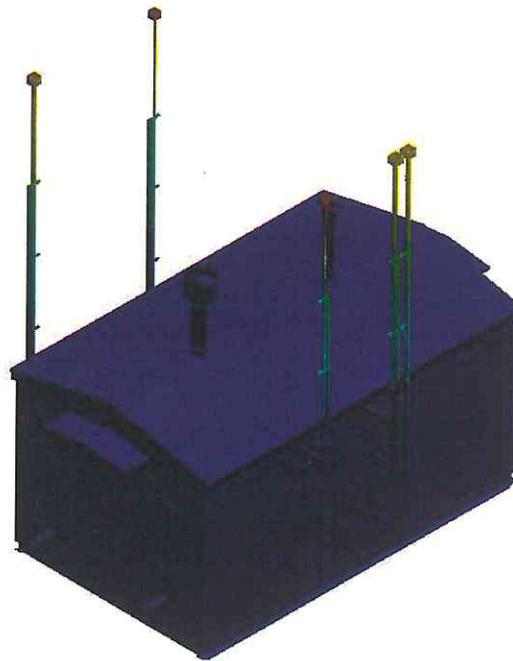
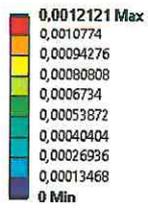


Рис. 12. Перемещения по оси X [м]

C: Response Spectrum  
Directional Deformation 2  
Type: Directional Deformation(Y Axis)  
Unit: m  
Solution Coordinate System  
Time: 0

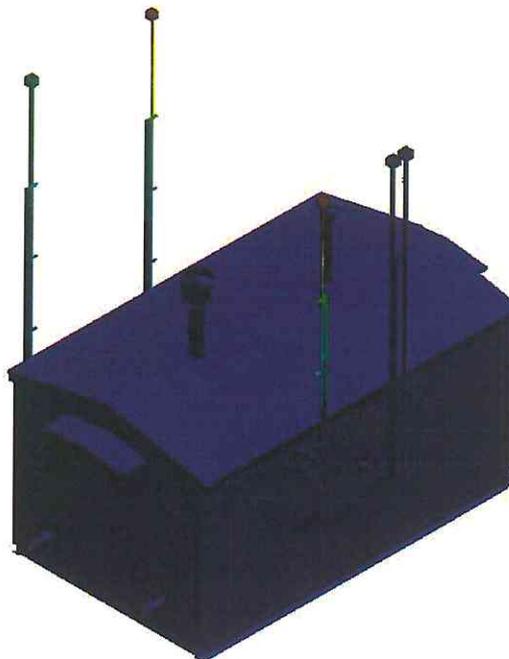
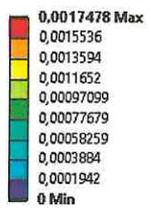


Рис. 13. Перемещения по оси Y [м]

C: Response Spectrum  
Directional Deformation 3  
Type: Directional Deformation(Z Axis)  
Unit: m  
Solution Coordinate System  
Time: 0

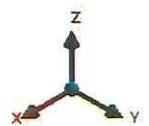
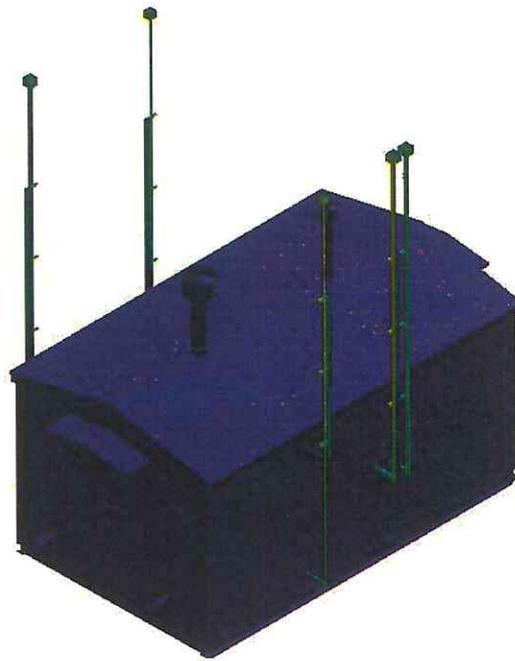
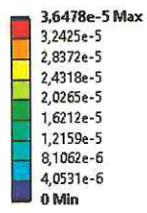


Рис. 14. Перемещения по оси Z [м]

C: Response Spectrum  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent Stress  
Unit: Pa  
Time: 0

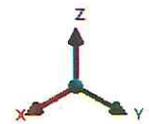
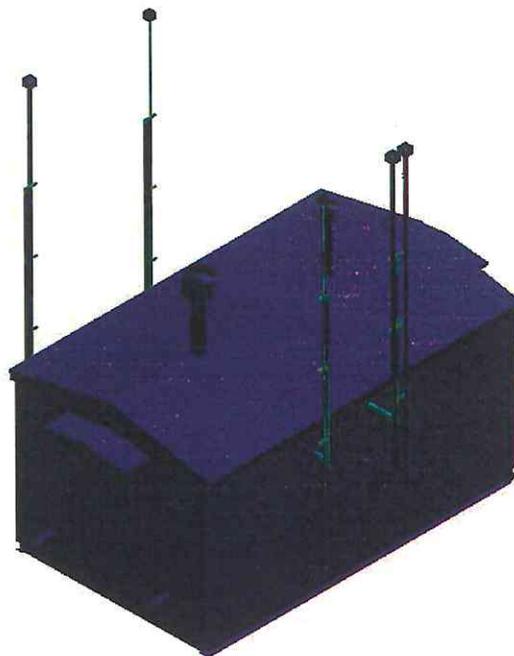
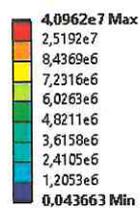


Рис. 15. Эквивалентные напряжения [Па]

C: Response Spectrum  
Directional Acceleration  
Type: Directional Acceleration  
Unit:  $m/s^2$   
Solution Coordinate System  
Time: 0

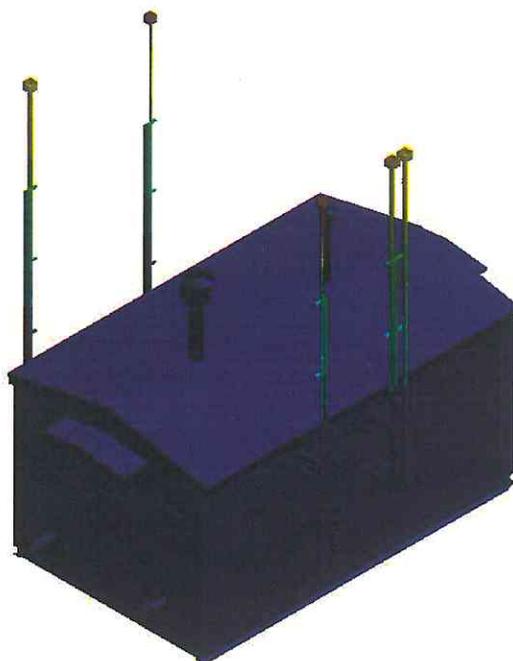
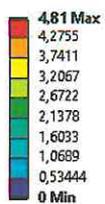


Рис. 16. Ускорение по оси X [ $m/s^2$ ]

C: Response Spectrum  
Directional Acceleration Z  
Type: Directional Acceleration  
Unit:  $m/s^2$   
Solution Coordinate System  
Time: 0

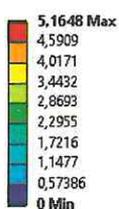


Рис. 17. Ускорение по оси Y [ $m/s^2$ ]

C: Response Spectrum  
Directional Acceleration 3  
Type: Directional Acceleration  
Unit:  $m/s^2$   
Solution Coordinate System  
Time: 0

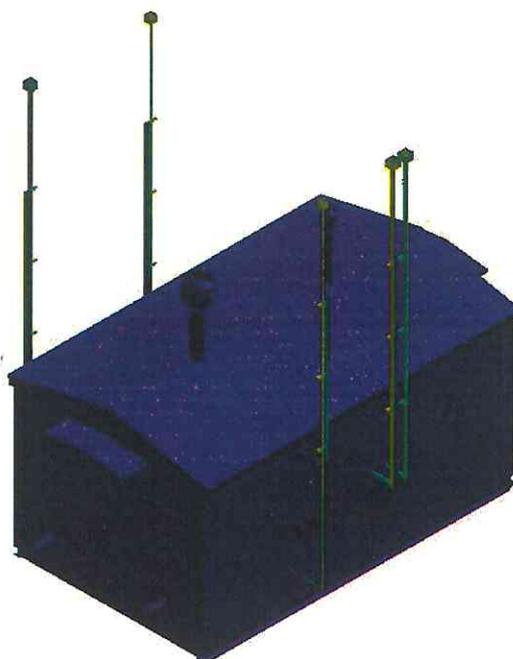
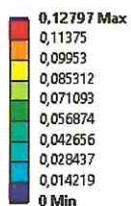


Рис. 18. Ускорение по оси Z [ $m/s^2$ ]

### 4.3. Визуализация коэффициента запаса прочности от сейсмического воздействия

D: Transient Structural  
Safety Factor  
Type: Safety Factor

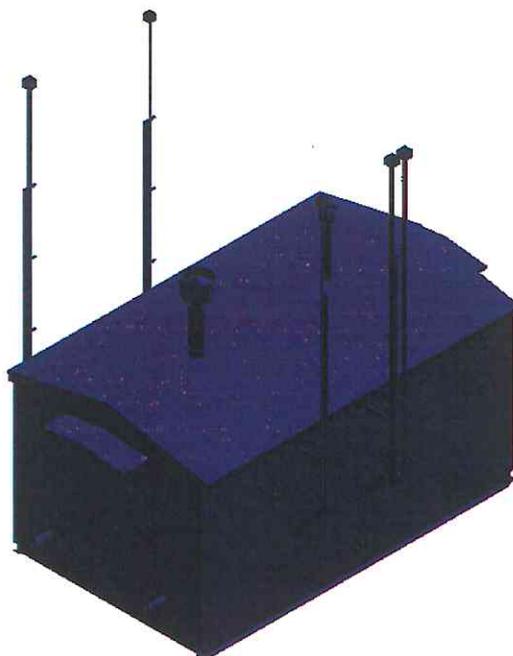


Рис. 19. Визуализация коэффициента запаса прочности

## 5. Общие выводы

1. Испытание на сейсмическое воздействие комплекса подготовки газа «Экс-Форма», выпускаемого по ТУ 28.99.39.190-037-12213528-2022, выполнено расчетным методом на основании технической документации, ГОСТ 30546.1-98 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и методы расчета их сложных конструкций в части сейсмостойкости», ГОСТ 30631-99 «Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации», СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах»;
2. В испытании представлены: собственные частоты колебаний КПП, сейсмическое воздействие на КПП, визуализация коэффициента запаса прочности;
3. На основании проведенного испытания можно сделать вывод, что прочность комплекса подготовки газа «Экс-Форма», выпускаемого по ТУ 28.99.39.190-037-12213528-2022, от сейсмического воздействия уровня в 9 баллов по шкале MSK-64 обеспечена;
4. На основании общности конструкции и применяемых материалов данное испытание можно распространить на станции газораспределительные блочные автоматизированные «Экс-Форма», выпускаемые по ТУ 3696-025-12213528-2009; комплексы подготовки газа «Экс-Форма», выпускаемые по ТУ 28.99.39.190-037-12213528-2022.