

**Испытательный центр электротехнических изделий  
«Строймонтаж»**

Закрытое Акционерное Общество Научно-производственный центр «Строймонтаж».  
Юр. адрес: 105082, г. Москва, ул. Большая Почтовая, 26в, стр.1.  
Адрес места осуществления деятельности: 140081, Россия, Московская область, г. Лыткарино, ул. Парковая, д. 1.  
тел/факс: 8 (499) 261-21-61  
e-mail: [izstroimontage@mail.ru](mailto:izstroimontage@mail.ru)

**ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 181-22/09**

Объект испытаний	Газопоршневая электростанция в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемая по РУНТ.561912.001ТУ № РОСС RU.31297.04ЖТУ0.004 от 01.07.2020 г.
Регистрационные данные ИЦ Документ, на соответствие которому проводились испытания	Испытания на соответствие требованиям безопасности по: ГОСТ 30546.1-98, ГОСТ 30546.2-98, ГОСТ 30546.3-98 (исполнение сейсмостойкости 7 баллов по шкале MSK-64).
Заявитель	Орган по сертификации: ООО «Центр сертификации «ВЕЛЕС», 195009, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 12, корп. 2, лит. А, эт. 2, комн. 26.
Изготовитель	АО «РУМО», 603073, г. Нижний Новгород, ул. Адмирала Нахимова, д. 13, литер АВ, этаж/помещение 2/83.
Место проведения испытаний	Лабораторный корпус ЗАО НПЦ «Строймонтаж», Московская область, г. Лыткарино, ул. Парковая, д. 1.
Дата проведения испытаний	20.09.2022
Результаты испытаний	См. Приложение 1

Руководитель испытательного центра электротехнических изделий «СТРОЙМОНТАЖ»



И.А. Панков  
20 сентября 2022 г.

Запрещается передача и частичная перепечатка протокола без разрешения испытательного центра. Протокол испытаний распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ:**

Газопоршневая электростанция в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемая по РУНТ.561912.001ТУ, соответствует требованиям безопасности по: ГОСТ 30546.1-98, ГОСТ 30546.2-98, ГОСТ 30546.3-98 (исполнение сейсмостойкости 7 баллов по шкале MSK-64).

Ввиду идентичности конструкции и применяемых материалов результаты испытаний могут быть распространены на Газопоршневые электростанции в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт (РУНТ.702.1000; РУНТ.70201.1000; РУНТ.70202.1000), выпускаемые по групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ.



Приложение №1  
к протоколу № 181-22/09

**Испытание на сейсмическое воздействие  
Газопоршневой электростанции в контейнерном  
исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью  
1000 кВт, выпускаемой по РУНТ.561912.001ТУ**



## Содержание

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



## 1. Общие сведения

Испытание на сейсмическое воздействие газопоршневой электростанции в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемой по РУНТ.561912.001ТУ (далее электростанции) выполнено 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. Нагрузки и воздействия, действующие на электростанцию

На основании технической документации, была смоделирована электростанция.

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

1. собственный вес;
2. сейсмическое воздействие 7 баллов по шкале MSK-64.

## 3. Методика расчета

Расчет выполнен в ПО ANSYS — универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа. ANSYS аттестован в ГОСАТОМНАДЗОРЕ России, ISO-9000 series, especially ISO-9001 and ISO 9000-3, Российской академией архитектуры и строительных наук.

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:

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

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);

$\{\epsilon_{el}\} = \{\epsilon\} - \{\epsilon_{th}\}$  – выходной массив;

$\{\epsilon\} = [\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z \epsilon_{xy} \epsilon_{xz} \epsilon_{yz}]^T$  - вектор полной (суммарной) деформации;

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

Компоненты вектора напряжений показаны на Рис. 1. 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.

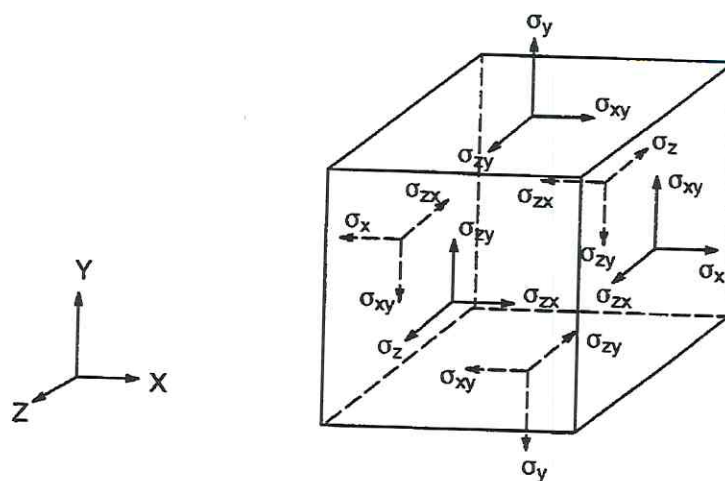


Рис. 1. Компоненты вектора напряжений

Уравнение (1) может быть обращено следующим образом:

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_{th}\} + [D]^{-1} \{\sigma\}.$$



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

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

При использовании нормализации по строкам, матрица записывается следующим образом:

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

Для записи элементов этих матриц используются обозначения:

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

$v_{xy}$  – минимальный коэффициент Пуассона,

$v^*_{xy}$  – 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:

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



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

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

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

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

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

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:

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

$$\begin{aligned} \sigma_y = & E_x/h [\nu_{xy} + \nu_{xz} \nu_{yz} E_y/E_z] (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + E_y/h [1 - \\ & - (\nu_{xz})^2 E_x/E_z] (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + E_y/h [\nu_{yz} + \nu_{xz} \nu_{xy} E_x/E_y] \\ & (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z = & E_x/h [\nu_{xz} + \nu_{yz} \nu_{xy}] (\varepsilon_x - \alpha_x \Delta T) + E_y/h [\nu_{yz} + \\ & + \nu_{xz} \nu_{xy} E_x/E_y] (\varepsilon_y - \alpha_y \Delta T) + E_z/h [1 - (\nu_{xy})^2 E_x/E_y] \\ & (\varepsilon_z - \alpha_z \Delta T), \end{aligned} \quad (19)$$

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

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

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

в которых обозначено:  $h = 1 - (\nu_{xy})^2 E_x/E_y - (\nu_{yz})^2 E_y/E_z - (\nu_{xz})^2 E_x/E_z - 2 \nu_{xy} \nu_{yz} \nu_{xz} E_x/E_z$ .

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

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

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

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





## 4. Расчет электростанции

Geometry

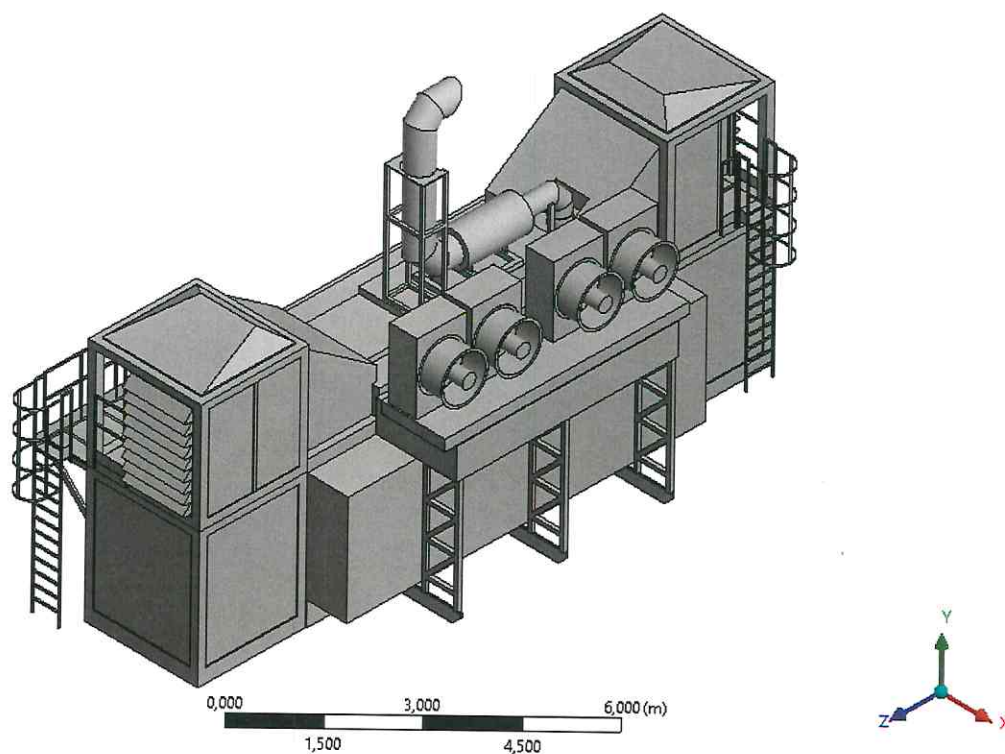


Рис. 2. Расчетная аппроксимированная модель

### 4.1. Определение собственных частот колебаний электростанции

№ Рис.	Форма колебаний	Частота, Гц
4	1	9,3505
5	2	9,3614
6	3	9,4148
7	4	9,4353
8	5	9,4417
9	6	9,5282

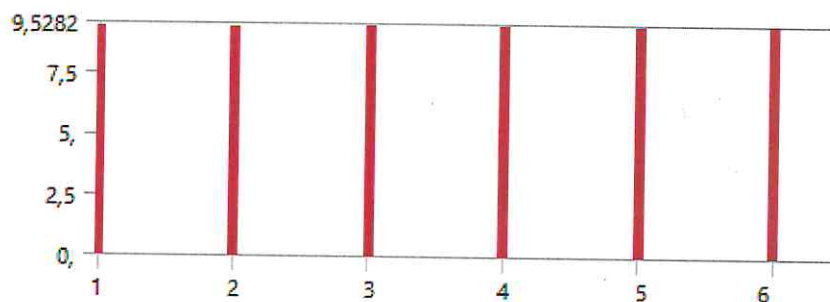


Рис. 3. Гистограмма собственных частот колебаний



B: Modal  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Frequency: 9,3505 Hz  
Unit: m

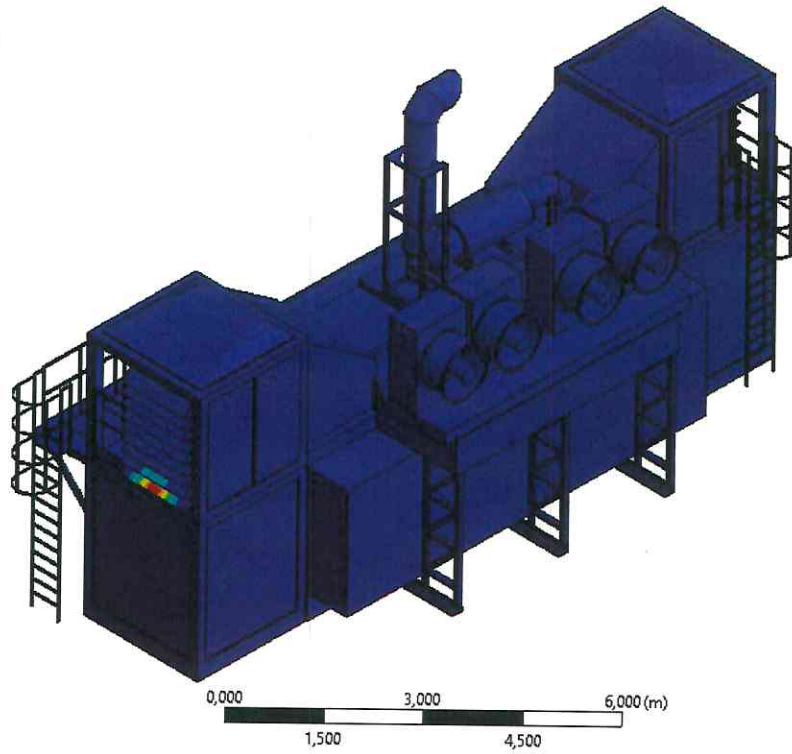
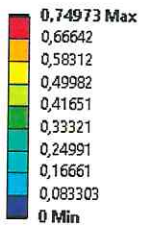


Рис. 4. Амплитуда при 1-й форме колебаний

B: Modal  
Total Deformation 2  
Type: Total Deformation  
Frequency: 9,3614 Hz  
Unit: m

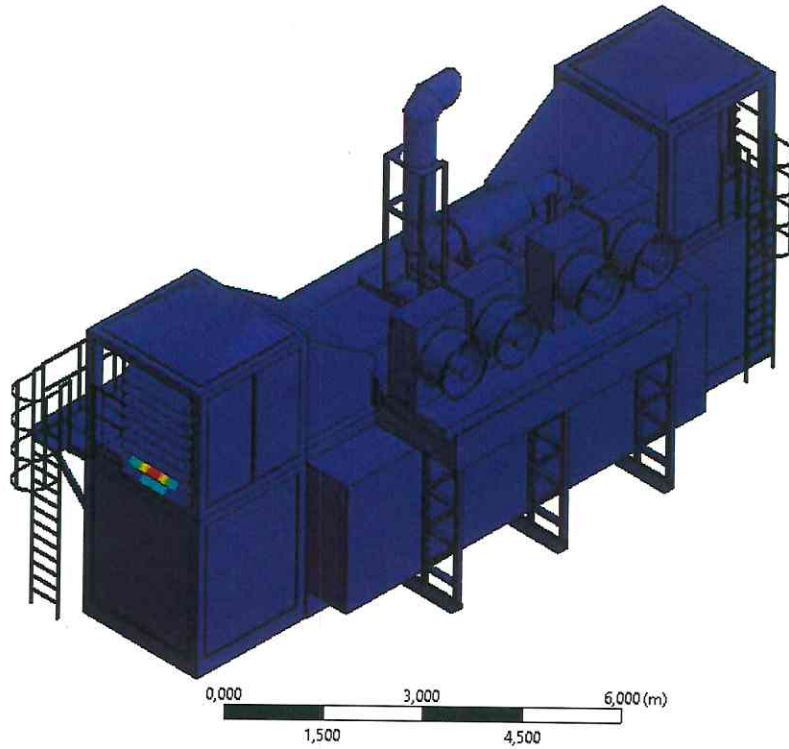
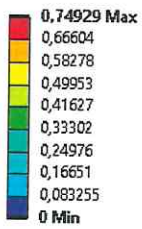


Рис. 5. Амплитуда при 2-й форме колебаний



**B: Modal**  
Total Deformation 3  
Type: Total Deformation  
Frequency: 9,4148 Hz  
Unit: m

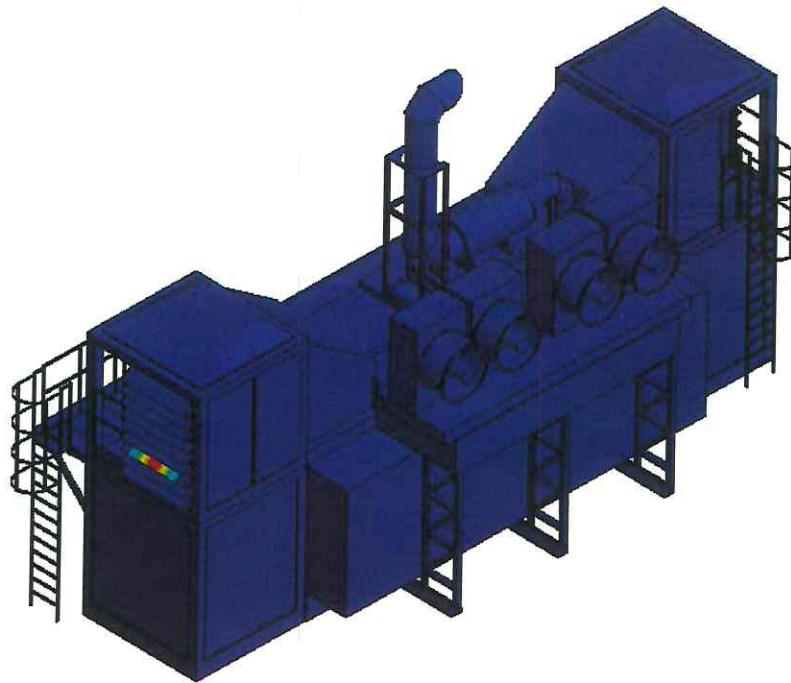
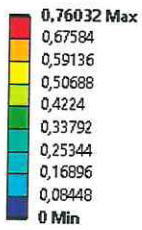


Рис. 6. Амплитуда при 3-й форме колебаний

**B: Modal**  
Total Deformation 4  
Type: Total Deformation  
Frequency: 9,4353 Hz  
Unit: m

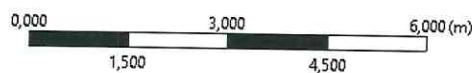
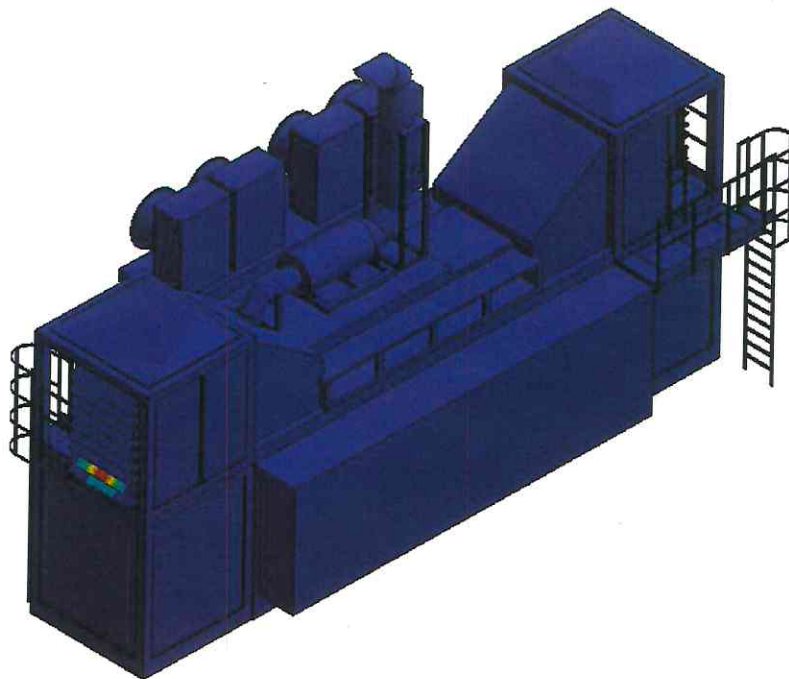
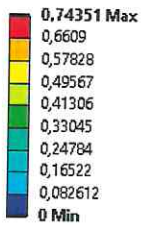


Рис. 7. Амплитуда при 4-й форме колебаний



**B: Modal**  
Total Deformation 5  
Type: Total Deformation  
Frequency: 9,4417 Hz  
Unit: m

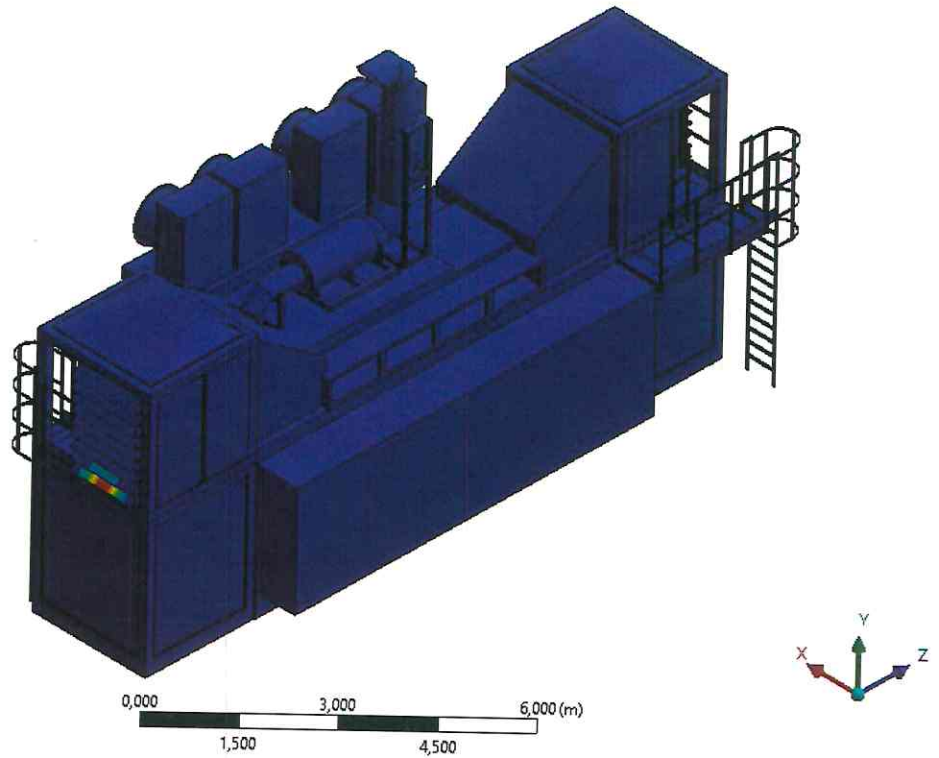
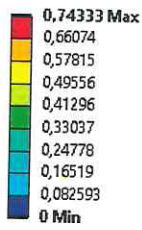


Рис. 8. Амплитуда при 5-й форме колебаний

**B: Modal**  
Total Deformation 6  
Type: Total Deformation  
Frequency: 9,5282 Hz  
Unit: m

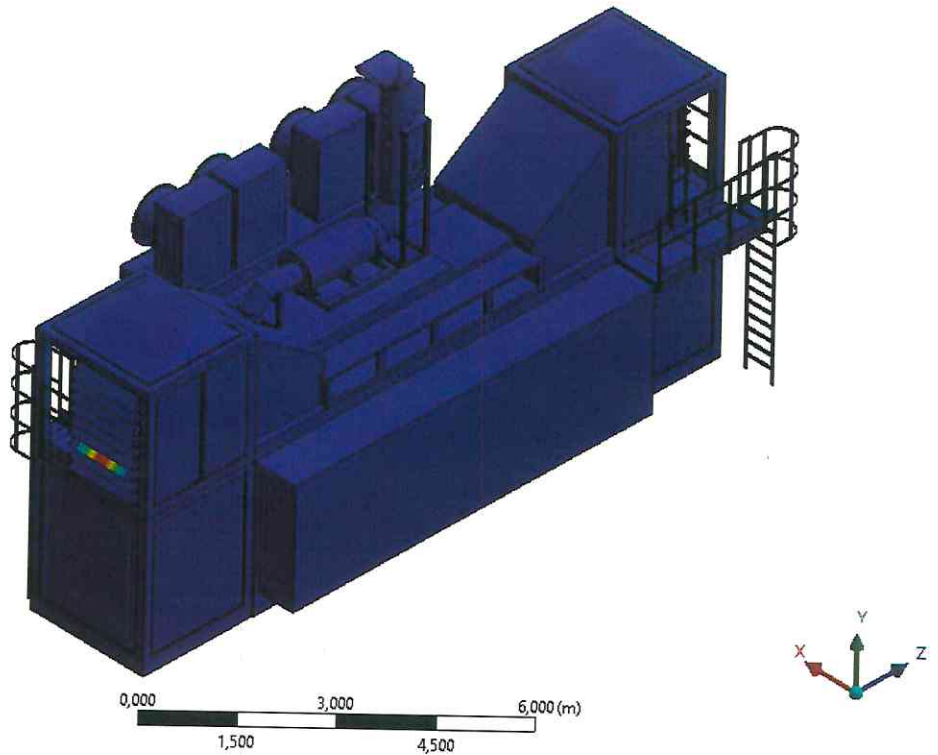
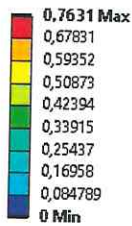


Рис. 9. Амплитуда при 6-й форме колебаний



## 4.2. Анализ сейсмического воздействия на электростанцию

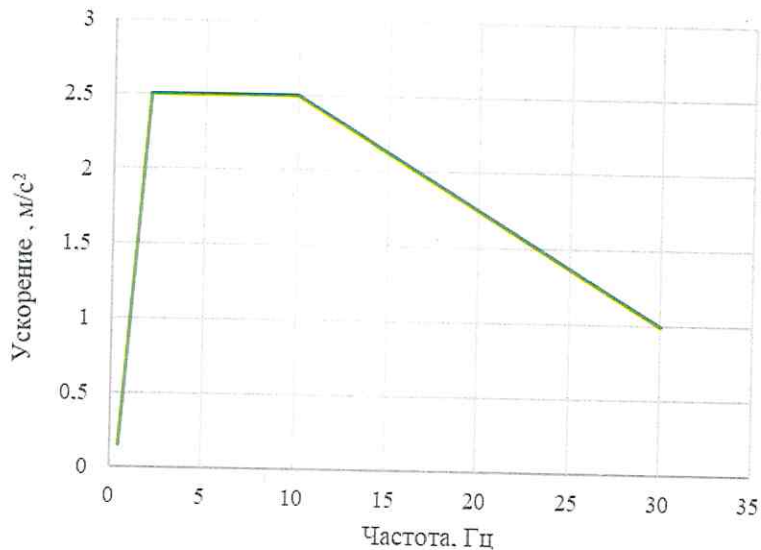


Рис. 10. График зависимости между максимальной амплитудой ускорения и частотой синусоидальной вибрации – расчетный спектр воздействия

Частота [Hz]	Ускорение [(m/s <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

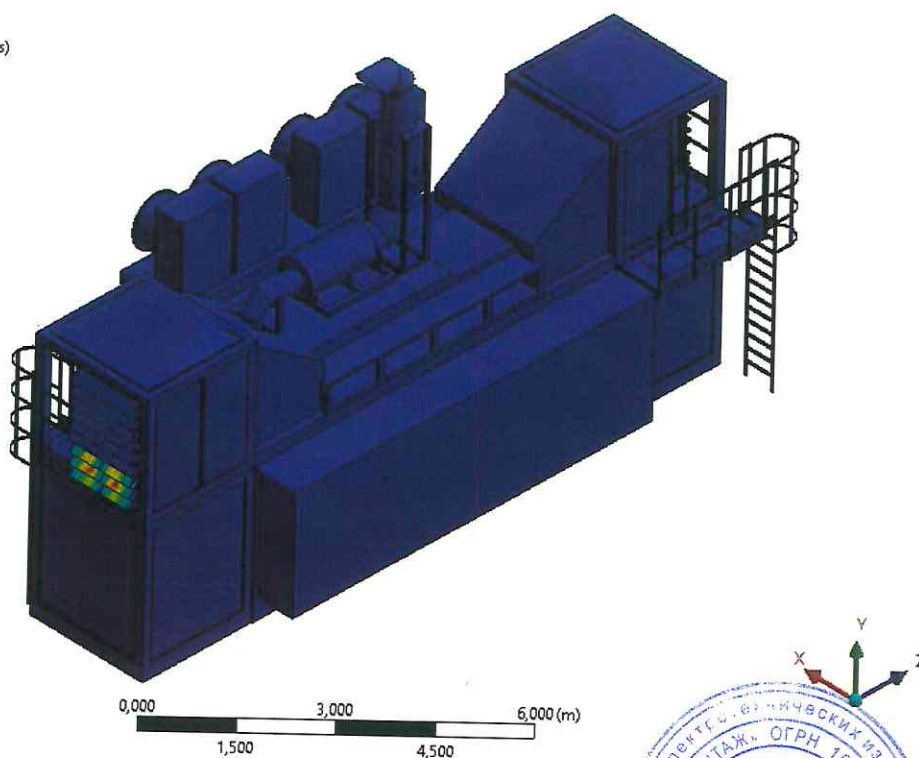
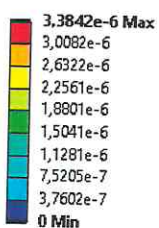


Рис. 11. Перемещения по оси X [м]



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

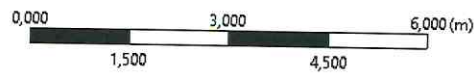
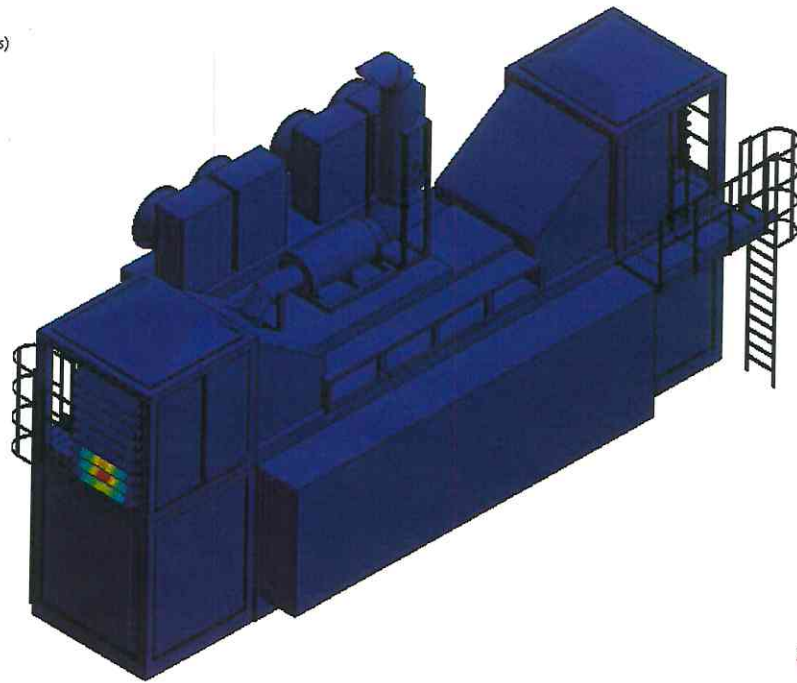
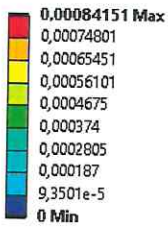


Рис. 12. Перемещения по оси Y [м]

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

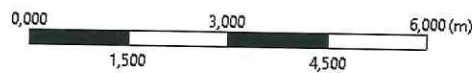
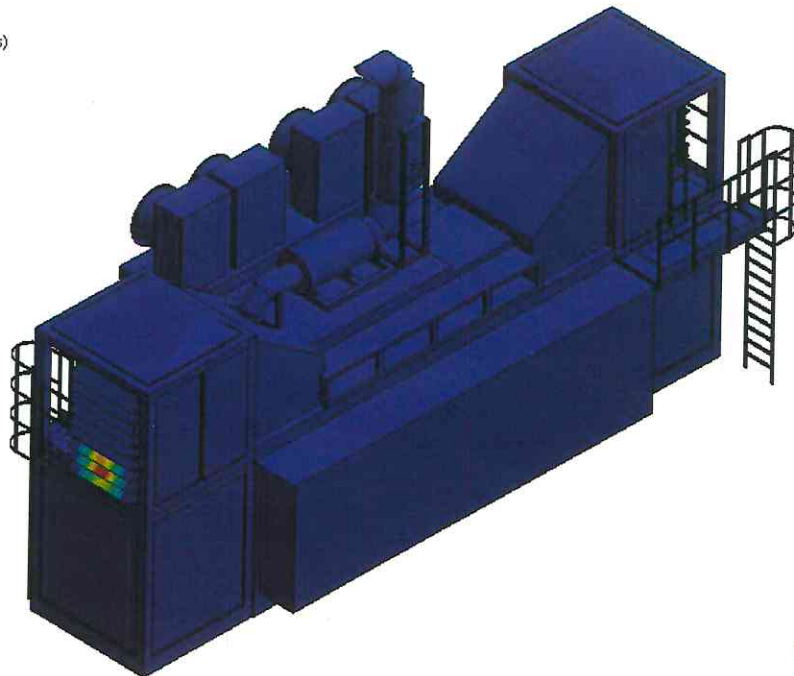
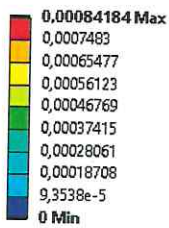


Рис. 13. Перемещения по оси Z [м]



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

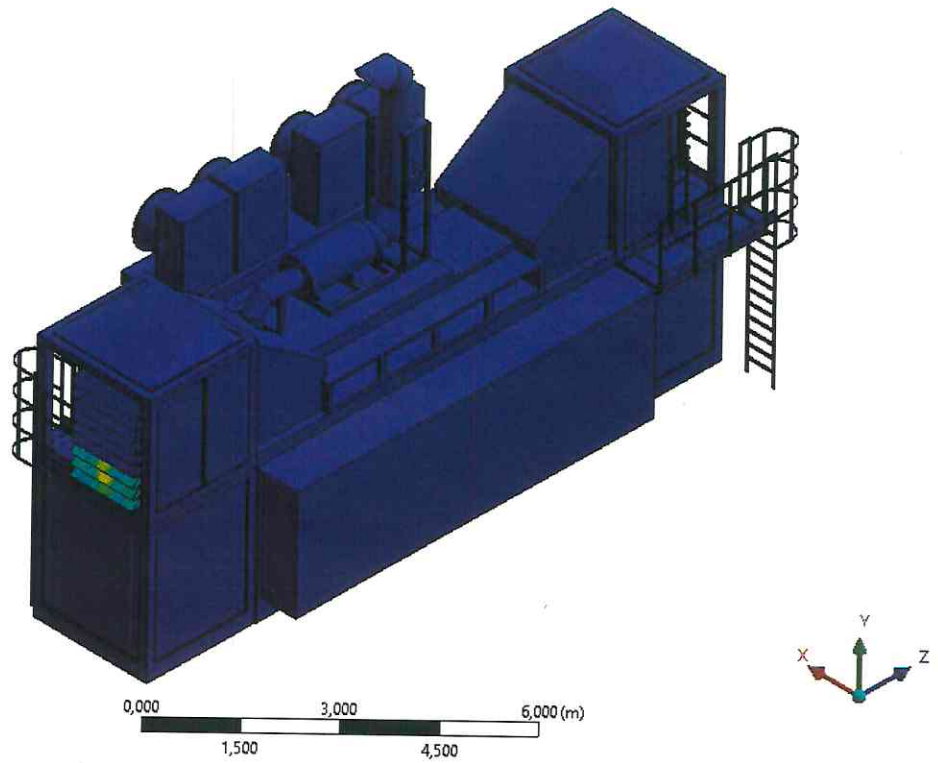
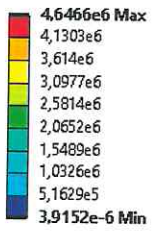


Рис. 14. Эквивалентные напряжения [Па]

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

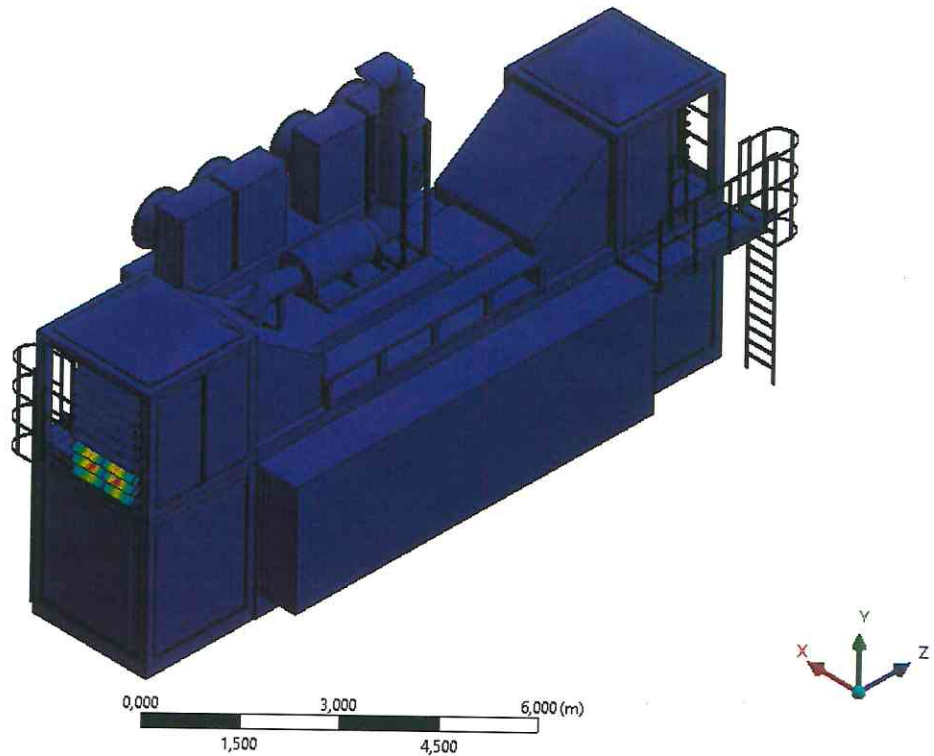
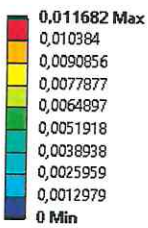


Рис. 15. Ускорение по оси X [ $m/s^2$ ]



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

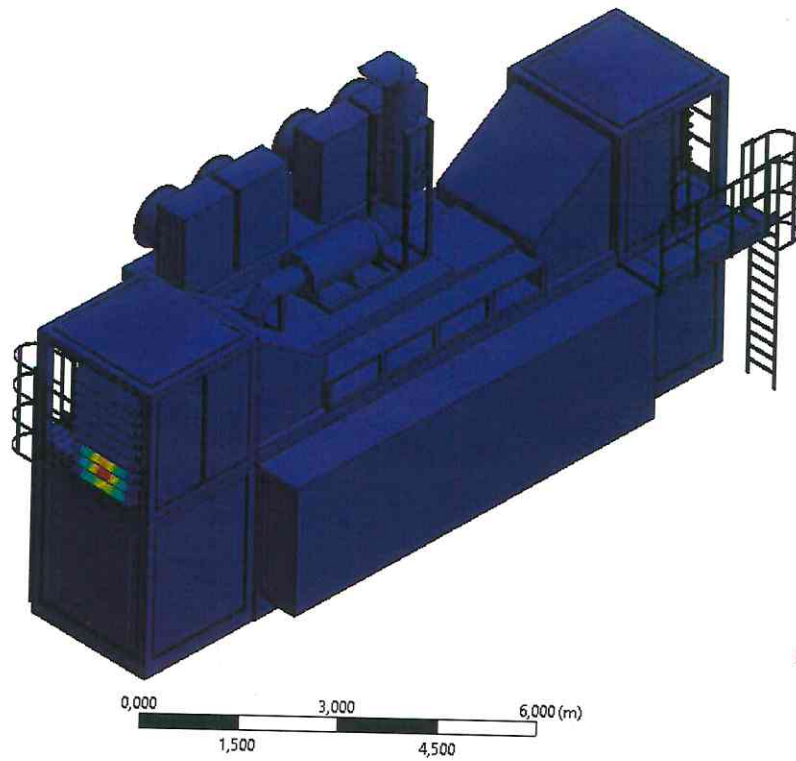
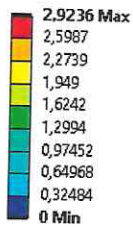


Рис. 16. Ускорение по оси Y [ $m/c^2$ ]

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

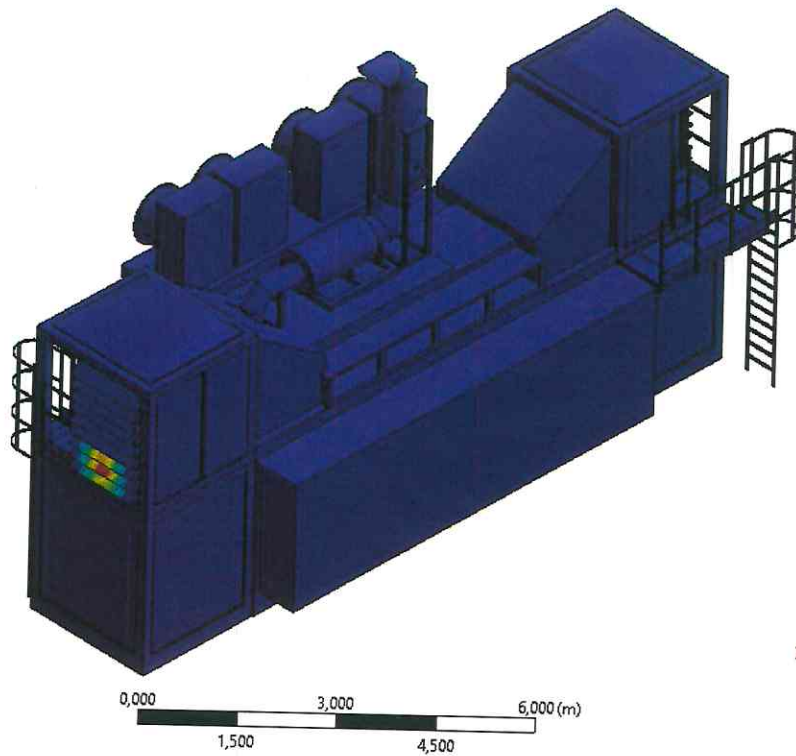
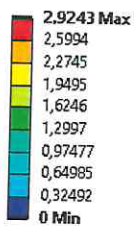


Рис. 17. Ускорение по оси Z [ $m/c^2$ ]





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

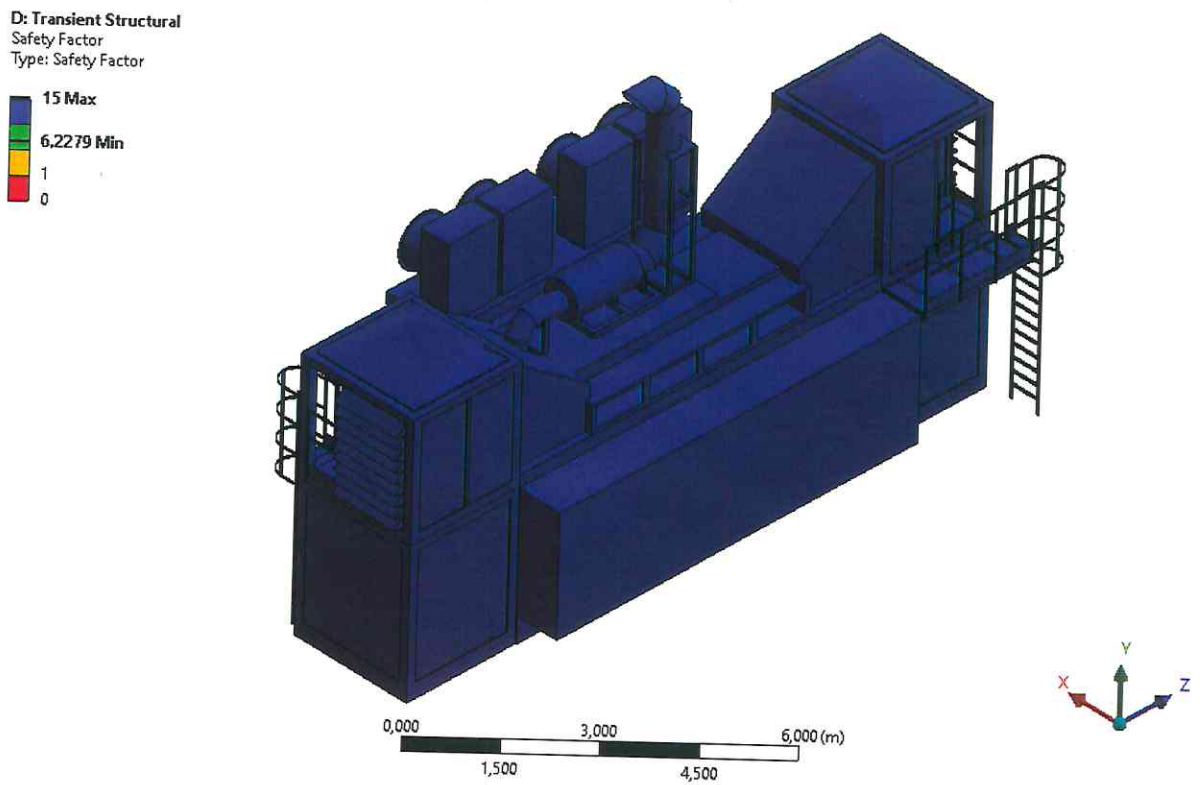


Рис. 18. Визуализация коэффициента запаса прочности



## 5. Общие выводы

1. Испытание на сейсмическое воздействие газопоршневой электростанции в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемой по РУНТ.561912.001ТУ выполнено 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 электростанции, сейсмическое воздействие на электростанцию, визуализация коэффициента запаса прочности;
3. На основании проведенного испытания можно сделать вывод, что прочность газопоршневой электростанции в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемой по РУНТ.561912.001ТУ от сейсмического воздействия 7 баллов по шкале MSK-64 обеспечена;
4. Ввиду идентичности конструкции и применяемых материалов результаты испытаний могут быть распространены на Газопоршневые электростанции в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт (РУНТ.702.1000; РУНТ.70201.1000; РУНТ.70202.1000), выпускаемые по групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ.

