

**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

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 11-23/04

Объект испытаний	Газопоршневая электростанция в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемая по групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ
Регистрационные данные ИЦ Документ, на соответствие которому проводились испытания	№ РОСС RU.31297.04ЖТУ0.004 от 01.07.2020 г. Испытания на соответствие требованиям безопасности по: ГОСТ 15150-69, ГОСТ 15543.1-89, ГОСТ 16962.1-89 (снеговой район IV, ветровой район V, гололедный район III).
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	05.04.2023
Результаты испытаний	См. Приложение 1

Руководитель испытательного центра
электротехнических изделий
«СТРОЙМОНТАЖ»

И.А. Панков
" 5 " апреля 2023 г. для
протоколов
испытаний



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 групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ, соответствует требованиям безопасности по: ГОСТ 15150-69, ГОСТ 15543.1-89, ГОСТ 16962.1-89 (снеговой район IV, ветровой район V, гололедный район III).

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.702.00.0000.000; РУНТ.702.1000; РУНТ.70201.1000; РУНТ.70202.1000), выпускаемые по групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ.



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



Содержание

1. Общие сведения.....	3
2. Нагрузки и воздействия, действующие на электростанцию.....	3
3. Методика расчета.....	3
4. Расчет электростанции на основное сочетание нагрузок.....	7
4.1. Анализ положительного климатического воздействия на электростанцию.....	9
4.2. Анализ отрицательного климатического воздействия на электростанцию.....	12
5. Общие выводы.....	16



1. Общие сведения

Испытание на климатическое воздействие газопоршневой электростанции в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемой по групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ (далее электростанция), выполнено на основании технической документации, ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды», ГОСТ 15543.1-89 «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам», ГОСТ 16962.1-89 «Изделия электротехнические. Методы испытаний на устойчивость к климатическим внешним воздействующим факторам», ГОСТ 30630.2.1-2013 «Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры».

2. Нагрузки и воздействия, действующие на электростанцию

На основании технической документации, была смоделирована электростанция.

Расчет включает в себя проверку конструкции на воздействие основного сочетания нагрузок. В качестве нагрузок были взяты следующие типы воздействий:

1. собственный вес;
2. атмосферное давление (среднее значение) 79.5 кПа (596 мм. рт. ст.);
3. температура окружающего воздуха от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$;
4. температура воздуха, окружающего электроагрегат от $+8^{\circ}\text{C}$ до $+50^{\circ}\text{C}$;
5. нормативное значение ветрового давления 0.60 кПа (V ветровой район);
6. нормативное значение снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности 2.0 кН/м^2 (IV снеговой район);
7. толщина стенки гололеда 10 мм (III гололедный район);
8. нормативное значение ветрового давления 0.60 кПа (V ветровой район).

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:

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

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);

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

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

$$\{\epsilon_{th}\} - \text{вектор температурной деформации.}$$

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.



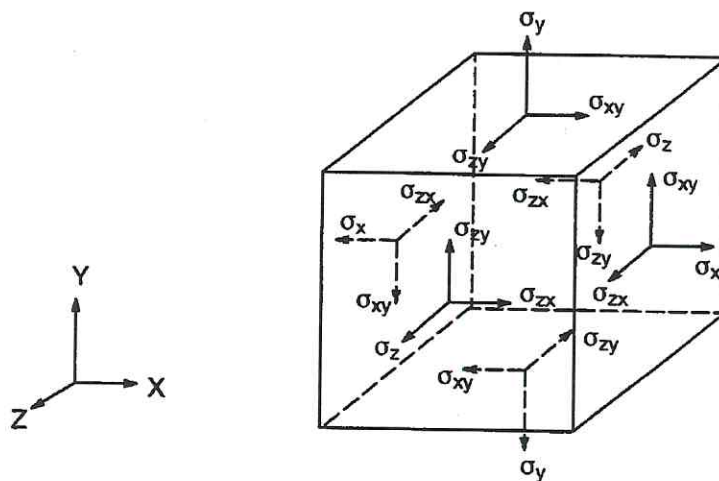


Рис. 1. Компоненты вектора напряжений

Уравнение (1) может быть обращено следующим образом:

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

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:

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

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

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

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

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

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

где ε_x – деформация в направлении оси x,

ε_{xy} – деформация сдвига в плоскости x-y,

σ_x – напряжения в направлении оси x,

σ_{xy} – напряжения сдвига в плоскости x-y;

Компоненты с другими индексами получают 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:

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

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



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

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

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

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

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

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 электростанции на основное сочетание нагрузок

Geometry

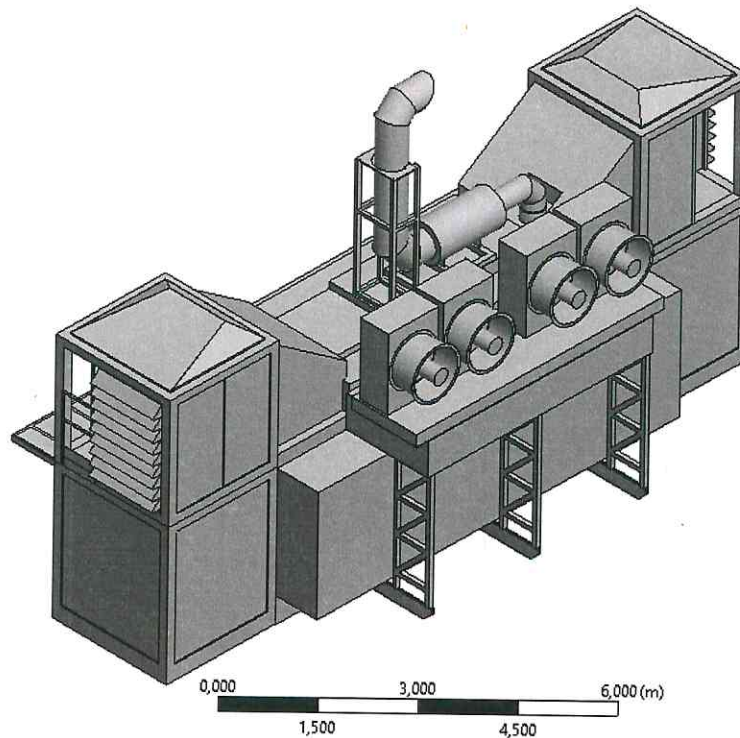


Рис. 2. Расчетная аппроксимированная модель



A: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1

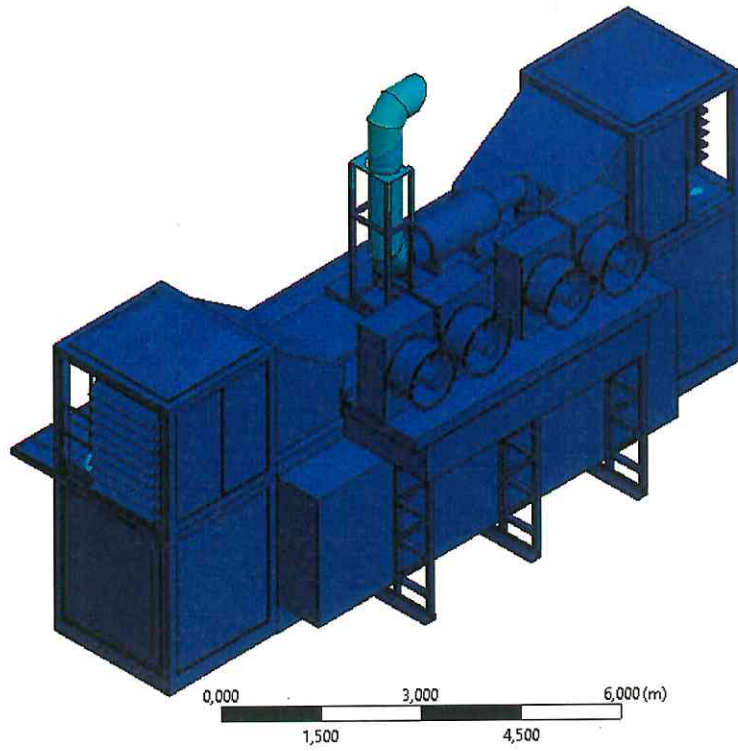
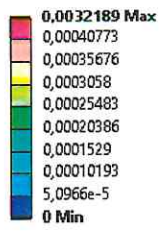


Рис. 3. Общие деформации [м]

A: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1

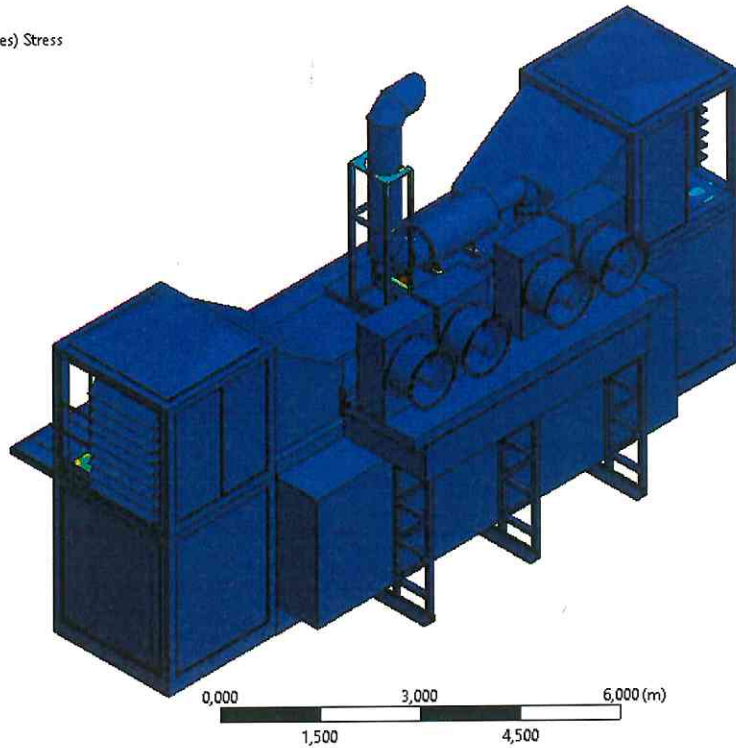
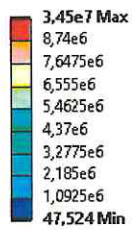


Рис. 4. Эквивалентные напряжения [Па]



4.1. Анализ положительного климатического воздействия на электростанцию

B: Transient Thermal
Total Heat Flux
Type: Total Heat Flux
Unit: W/m²
Time: 1

2716,7 Max
2227,7
1949,3
1670,8
1392,3
1113,9
835,39
556,93
278,46
3,2086e-11 Min

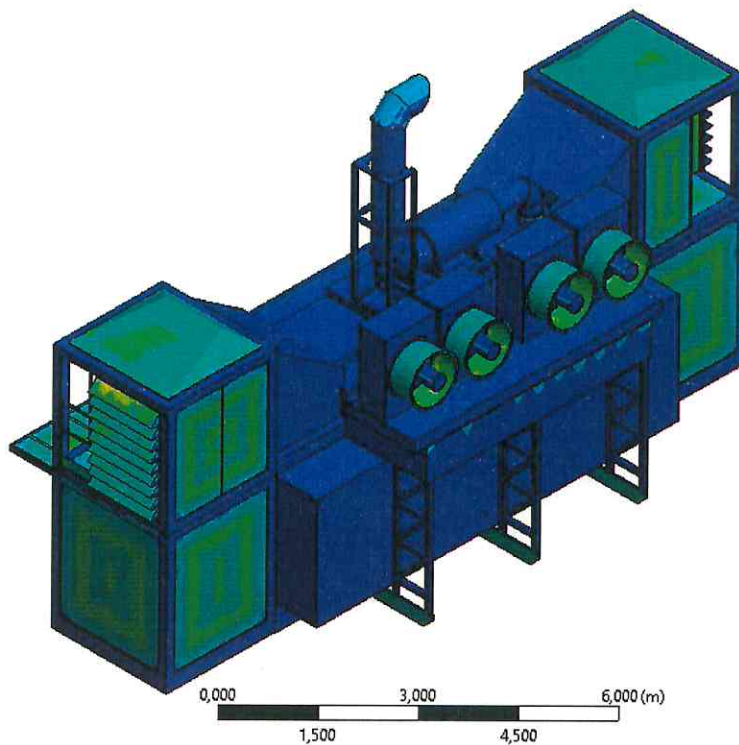


Рис. 5. Общий тепловой поток

D: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1

0,0032165 Max
0,00030021
0,00026268
0,00022516
0,00018763
0,0001501
0,00011258
7,5052e-5
3,7526e-5
0 Min

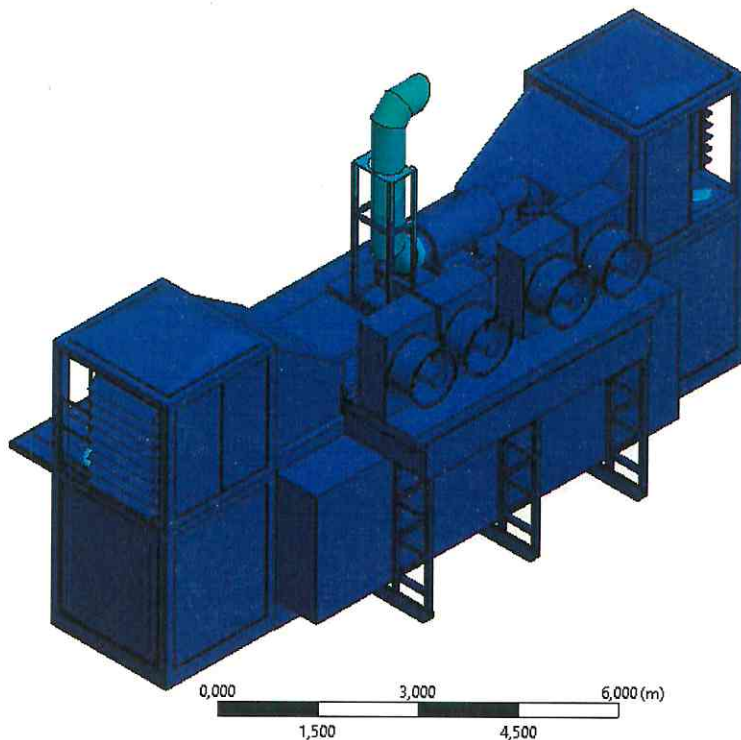


Рис. 6. Общие деформации [м]



D: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1

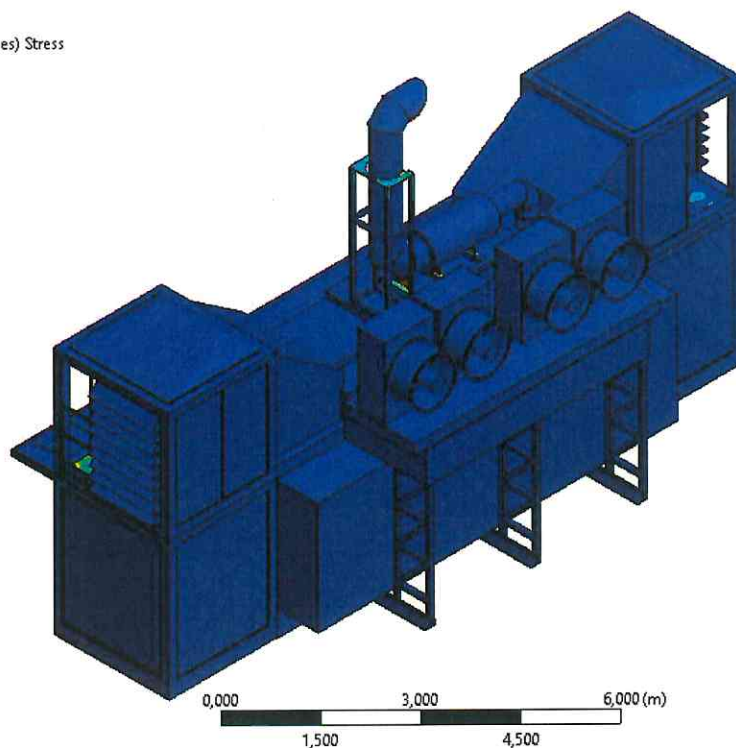
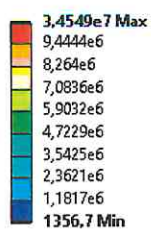


Рис. 7. Эквивалентные напряжения [Па]

D: Static Structural
Normal Stress
Type: Normal Stress(X Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 1

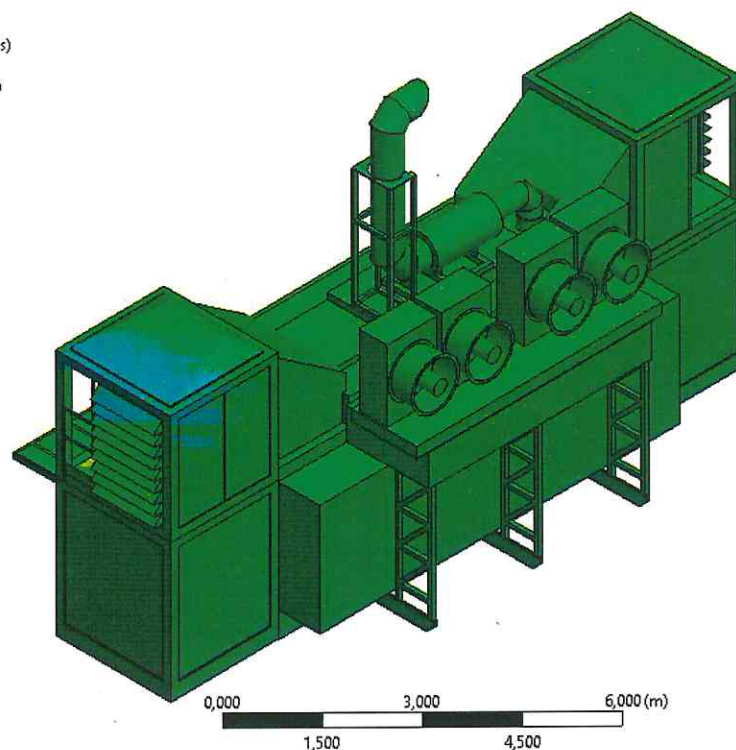
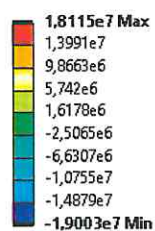


Рис. 8. Нормальные напряжения по X [Па]



D: Static Structural
Normal Stress 2
Type: Normal Stress(Y Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 1

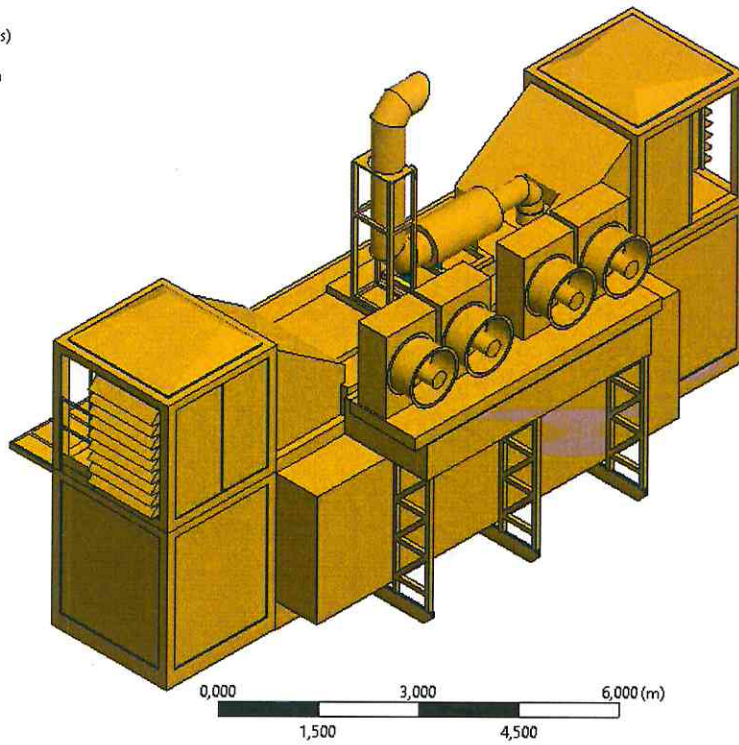
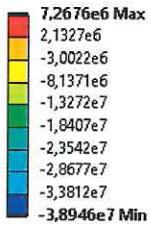


Рис. 9. Нормальные напряжения по Y [Па]

D: Static Structural
Normal Stress 3
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 1

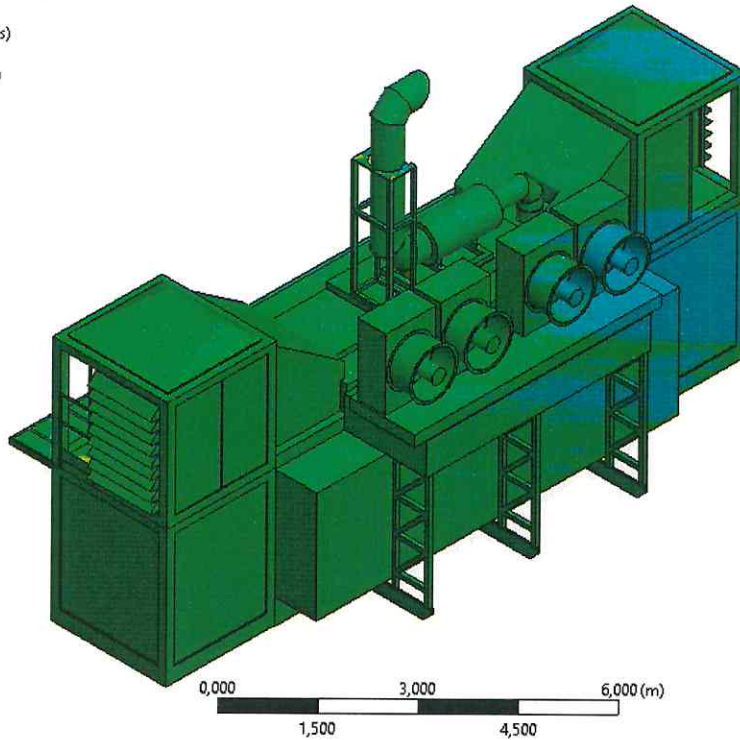
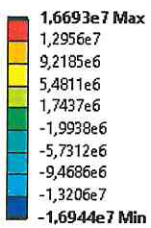


Рис. 10. Нормальные напряжения по Z [Па]



D: Static Structural
Safety Factor
Type: Safety Factor

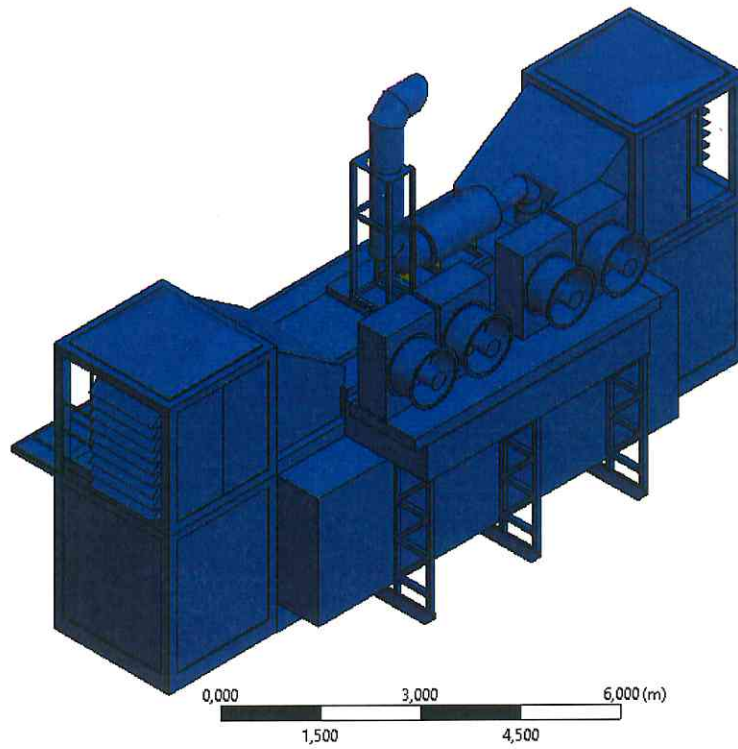
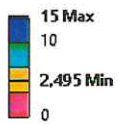


Рис. 11. Визуализация коэффициента запаса прочности

4.2. Анализ отрицательного климатического воздействия на электростанцию

C: Copy of Transient Thermal
Total Heat Flux
Type: Total Heat Flux
Unit: W/m²
Time: 1

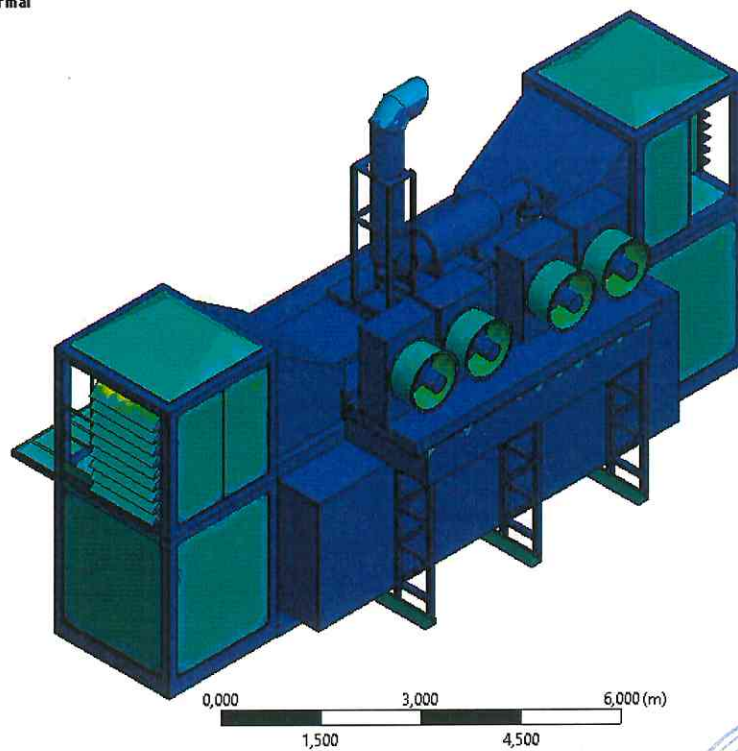
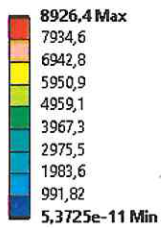


Рис. 12. Общий тепловой поток



E: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1

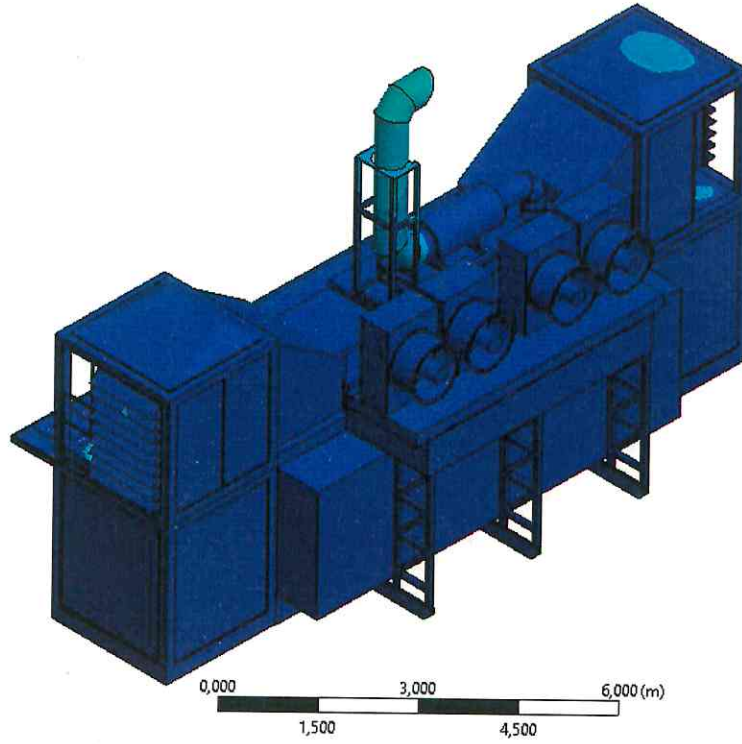
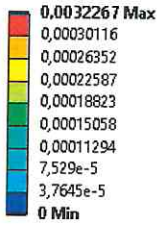


Рис. 13. Общие деформации [м]

E: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1

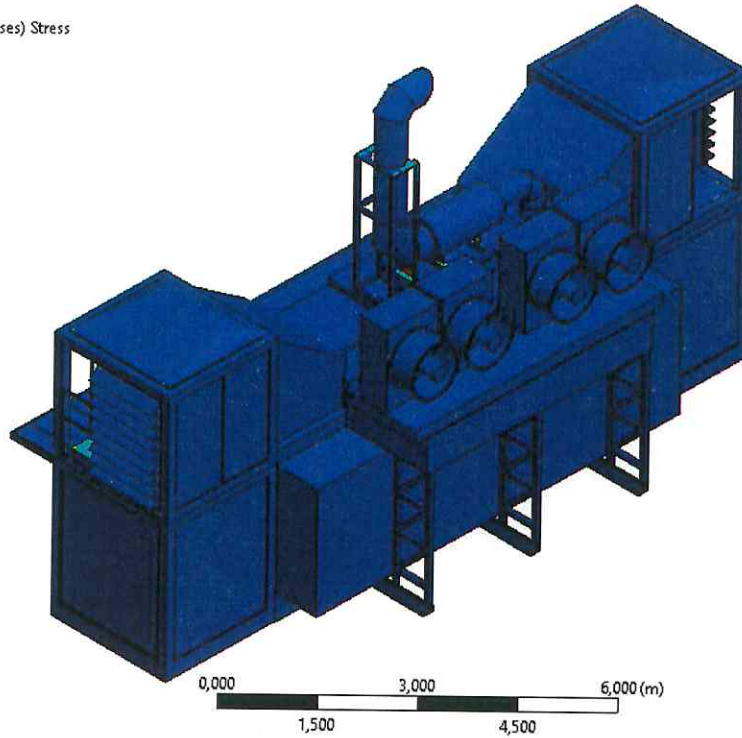
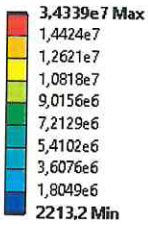


Рис. 14. Эквивалентные напряжения [Па]



E: Static Structural
 Normal Stress
 Type: Normal Stress(X Axis)
 Unit: Pa
 Global Coordinate System
 Time: 1

1,8274e7 Max
 1,4118e7
 9,9612e6
 5,8048e6
 1,6484e6
 -2,508e6
 -6,6644e6
 -1,0821e7
 -1,4977e7
 -1,9133e7 Min

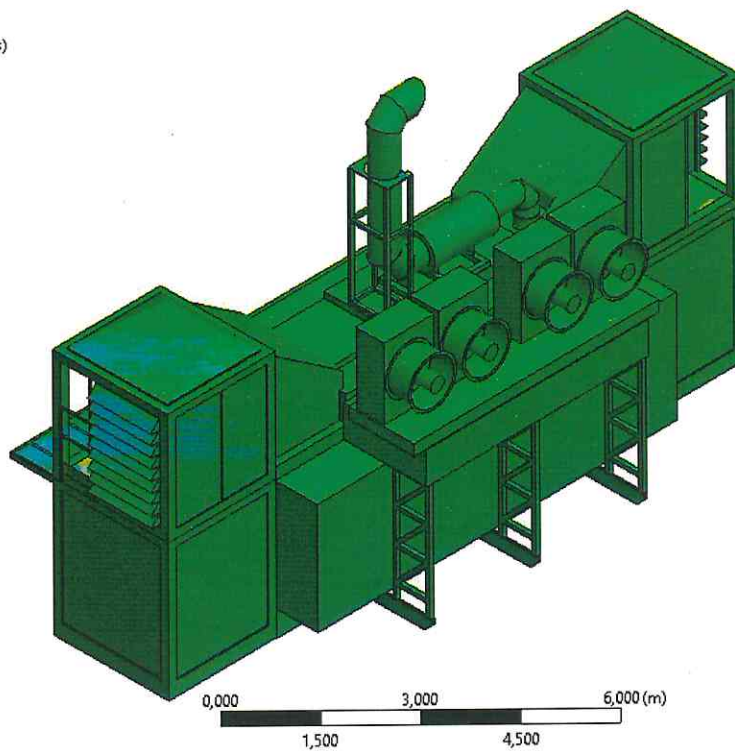


Рис. 15. Нормальные напряжения по X [Па]

E: Static Structural
 Normal Stress 2
 Type: Normal Stress(Y Axis)
 Unit: Pa
 Global Coordinate System
 Time: 1

7,3665e6 Max
 2,2572e6
 -2,8521e6
 -7,9613e6
 -1,3071e7
 -1,818e7
 -2,3289e7
 -2,8398e7
 -3,3508e7
 -3,8617e7 Min

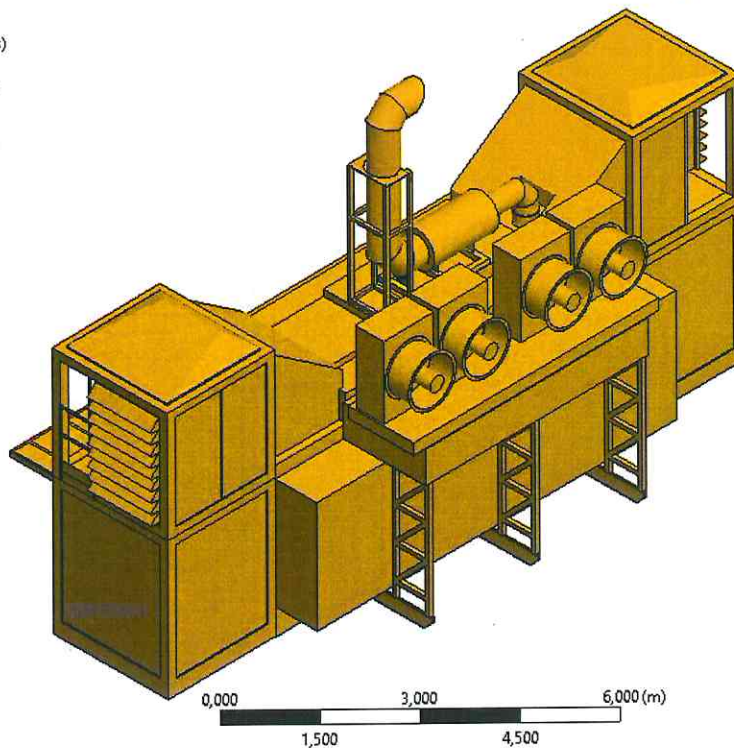


Рис. 16. Нормальные напряжения по Y [Па]



E: Static Structural
Normal Stress 3
Type: Normal Stress(Z Axis)
Unit: Pa
Global Coordinate System
Time: 1

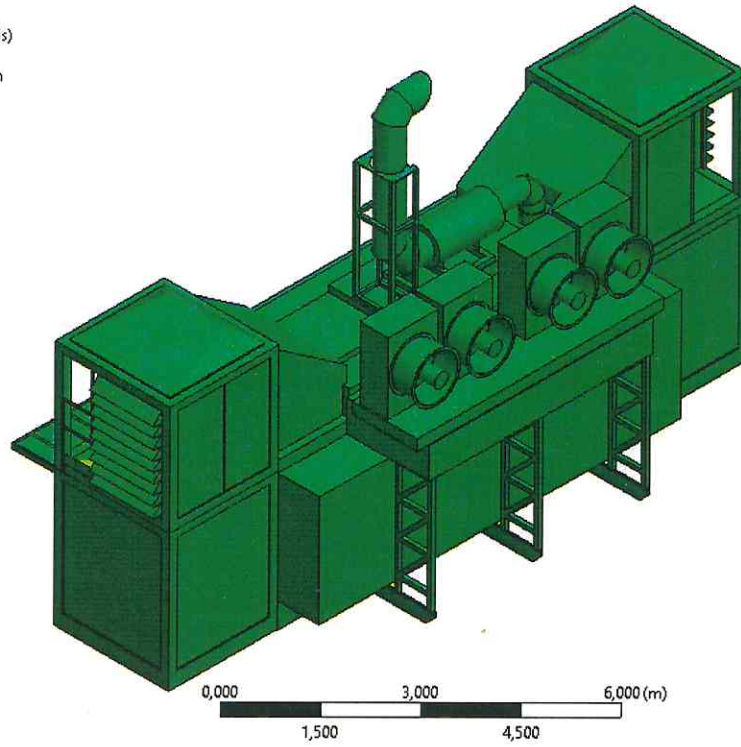
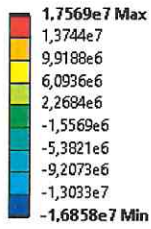


Рис. 17. Нормальные напряжения по Z [Па]

E: Static Structural
Safety Factor
Type: Safety Factor

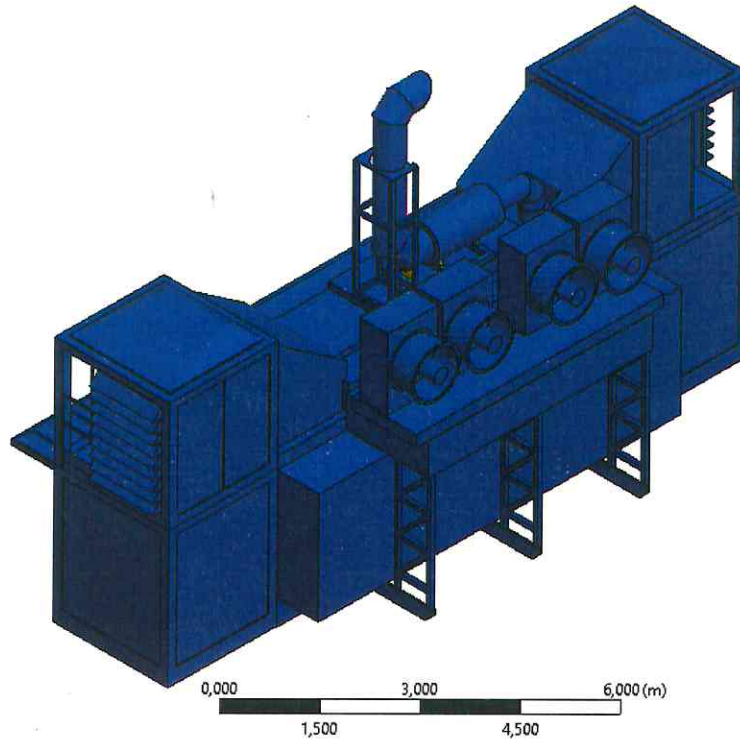
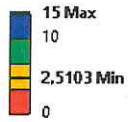


Рис. 18. Визуализация коэффициента запаса прочности



5. Общие выводы

1. Испытание на климатическое воздействие газопоршневой электростанции в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемой по групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ, выполнено на основании технической документации, ГОСТ 15150-69 «Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды», ГОСТ 15543.1-89 «Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам», ГОСТ 16962.1-89 «Изделия электротехнические. Методы испытаний на устойчивость к климатическим внешним воздействующим факторам», ГОСТ 30630.2.1-2013 «Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры»;
2. В испытании представлены: климатическое воздействие на электростанцию, визуализация коэффициента запаса прочности;
Проведенный анализ показывает, что:
 - при проведении основных сочетаний нагрузок (ветровых, снеговых, гололедных (п. 4 рис. 2-4), основные элементы конструкции электростанции имеют высокий коэффициент запаса прочности.
 - при положительном климатическом воздействии на электростанцию (п. 4.1 рис. 5-11), конструкция станции имеет высокий коэффициент запаса прочности.
 - при отрицательном климатическом воздействии на электростанцию (п. 4.2 рис. 12-18), конструкция станции имеет так же высокий коэффициент запаса прочности.
3. На основании проведенных испытаний можно сделать вывод, что прочность газопоршневой электростанции в контейнерном исполнении РУМО-702 с номинальной мощностью 1000 кВт, выпускаемой по групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ, от отрицательного (-50°C) и положительного ($+50^{\circ}\text{C}$) климатического воздействия IV снегового района, V ветрового района, III гололедного района обеспечивается;
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.702.00.0000.000; РУНТ.702.1000; РУНТ.70201.1000; РУНТ.70202.1000), выпускаемые по групповым техническим условиям РУНТ.561912.001ТУ.

