



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (по отраслям) (технические науки)
УДК 621.311

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.030



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООВОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Константин Константинович Бахрунов ¹, Алексей Николаевич Павлов ²,
Татьяна Ивановна Некипелова ³

^{1,3} Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, Улан-Удэ, Россия

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

¹ bkk1975@mail.ru,

² pavlov-msf-vsugutu@mail.ru,

³ imi_bsu@mail.ru

Аннотация. В работе представлено моделирование нагревательного устройства кипятильник универсальный марки КУ-200-2с применяемых в летательных аппаратах. Приводятся распределение полей температур по сечению изделия в процессе нагрева, возникающие при этом остаточные деформации и напряжения. Результаты исследования предлагается использовать для совершенствования работы изделия с учетом условий внешней среды и оптимизации веса конструкции.

Ключевые слова: численное моделирование, нагревательное устройство, нержавеющая сталь, кипятильник универсальный, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, теплопроводность.

Для цитирования: Бахрунов К.К., Павлов А. Н., Некипелова Т. И. Моделирование процессов теплового напряженно-деформированного состояния нагревательного устройства // Ползуновский вестник. 2024. № 3. С. 206 – 212. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.030, EDN: <https://elibrary.ru/GURGED>.

Original article

MODELING OF THE PROCESSES OF THERMAL STRESS-STRAIN STATE OF A HEATING DEVICE

Konstantin K. Bakhrunov ¹, Alexey N. Pavlov ², Tatyana I. Nekipelova ³

^{1,3} Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, Ulan-Ude, Russia

² East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

¹ bkk1975@mail.ru,

² pavlov-msf-vsugutu@mail.ru,

³ imi_bsu@mail.ru

Abstract. The paper presents a simulation of a heating device, a universal boiler of the KU-200-2c brand used in lethal devices. The distribution of temperature fields along the section of the product during the heating process, resulting in residual deformations and stresses, is given. The results of the study are proposed to be used to improve the operation of the product, taking into account environmental conditions and optimizing the weight of the structure.

Keywords: numerical simulation, heating device, stainless steel, universal boiler, stress-strain state, finite element method, thermal conductivity.

For citation: Bakhrunov K. K., Pavlov A. N., & Nekipelova T. I. (2024). Modeling of the processes of thermal stress-strain state of a heating device. *Polzunovskiy vestnik*. (3), 206-212. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.03.030. EDN: <https://elibrary.ru/GURGED>.

© Бахрунов К.К., Павлов А. Н., Некипелова Т. И., 2024

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООВОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

ВВЕДЕНИЕ

В быту и промышленности находит широкое применение различные виды и конструкции нагревательных устройств [1]. К одним из таких устройств относятся кипятильник универсальный марки КУ-200-2с (КУ), данное устройство применяется на борту отечественных летательных аппаратов (самолетов и вертолетов). Основное назначение КУ – это кипячения воды, а также поддерживать постоянную температуру горячей воды длительное время в состоянии полета. К таким устройствам предъявляются особенные требования при эксплуатации.

Для решения задачи требуется привлечение численных методов расчета широко используемых в инженерной практике [2, 3]. Когда нет возможности применить экспериментальную составляющую связанную со многими трудностями и энергозатратами во времени, то для исследования сложных процессов теплопроводности широко применяют моделирование. Современные программные средства позволяют ускорить процесс разработки сложных моделей за счет применения унифицированных алгоритмов. Наиболее эффективно задача расчета применяется с привлечением математического моделирования и алгоритмизации на основе метода конечных элементов (МКЭ) [4-8].

Целью работы является рассчитать поле температур и возникающие вследствие этого максимальные тепловые поля по деформации и напряжению с целью оптимизации массы конструкции материала изделия.

МЕТОДЫ

КУ состоит из корпуса, крана, верхней и задней крышек, нагревательных элементов и штепсельного разъема. Корпус представляет собой сварной сосуд с двойными стенками, изготовленный из нержавеющей стали. Он состоит из внутренней емкости, являющейся рабочим объемом кипятильника и внешнего кожуха, предназначенного для защиты внутренних элементов кипятильника от повреждений и создания теплоизоляционной воздушной прослойки. Верхняя крышка, закрывающая внутреннюю емкость кипятильника, полая и эта полость герметична. Спереди на верхней крышке расположен патрубок сигнализатора закипания. На верхней крышке имеется ручка для переноса кипятильника. Под крышкой устанавливается прокладка.

Общий вид и геометрическая модель изделия показана на рисунках 1а и 1б.

Геометрическая модель изделия выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т,

так как линейные размеры корпуса изделия значительно превышают толщину его стенок (0,8 мм), то исходная геометрическая модель допускает переход к тонкостенной модели. Стенки внешнего кожуха, внутренней емкости и крышки были заменены на поверхности (оболочки), для которых толщина является параметром, задаваемым при численном решении задачи. Воздушные прослойки между внешним кожухом и внутренней емкостью были смоделированы объемными телами. В результате получена расчетная геометрическая модель, показанная на рисунке 2.

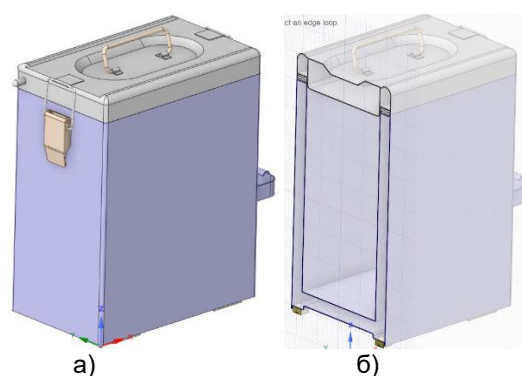


Рисунок 1 – Геометрическая модель изделия слева (а) и в сечении справа (б)

Figure 1 – Geometric model of the product on the left (a) and in section on the right (b)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Теплопроводность – это процесс передачи энергии в виде теплоты между соприкасающимися телами, имеющими разные температуры.

Рассмотрим уравнение нестационарной теплопроводности для однородного твердого тела, занимающего конечный объем в декартовых системах координат будет иметь вид:

$$k_{xx} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + w = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

где $T = T(x, y, z, t)$ – поле температур в произвольной области; k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} – коэффициенты теплопроводности в направлении x , y , z ,

$w = w(x, y, z, t)$ – мощность теплоисточника внутри тела; ρ – плотность материала тела; c – удельная теплоемкость материала тела.

Для частного решения (1) должны быть заданы начальные и граничные условия.

Исходная задача разделяется на тепловую и прочностную части. В тепловой части к модели прикладываются соответствующие граничные условия и рассчитывается поле

температуры в заданных условиях. Затем, полученные узловые температуры прикладываются в качестве граничных условий при решении прочностной задачи.

Корпус, внутренняя емкость и крышка изделия выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Для материала прокладки между крышкой и корпусом использовались свойства жесткой резины и линейная модель поведения. Необходимые для решения задачи физические свойства материалов показаны на рисунках 3 – 5.

Для тепловой части задачи используются следующие граничные условия: температура на стенках внутренней емкости изделия, принята постоянной и равной 85°C, распределение температуры показано на рис.7; граничные условия для наружных стенок корпуса представлен на рисунке 8.

Граничные условия – на части поверхности S устройства задана температура $T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$T = T(x, y, z, t), \quad x, y, z \in S. \quad (2)$$

Конвективное условие (тепловой поток на границе): для наружных стенок корпуса задан переменный коэффициент теплообмена, соответствующий случаю теплоотдачи вертикальной стенки в неподвижную воздушную среду, представленная на рис.8; на дне корпуса задан постоянный коэффициент теплообмена, показанный на рис.9.

Граничные условия на части поверхности S стенки устройства задан тепловой поток плотность Q:

$$k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} l_x + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} l_y + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} l_z + w = -Q \quad (3)$$

где k_x, l_x, l_z – направляющие косинуса внешней нормали к поверхности S, тепловой поток плотностью Q.

Граничные условия на части поверхности S стенки устройства происходит конвективный теплообмен:

$$k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -h \cdot (T_s - T_{cp}) \quad (4)$$

где T_s – температура поверхности S, T_{cp} – температура внешней среды, h – коэффициент теплоотдачи, $q = q = -h \cdot (T_s - T_{cp})$ – плотность теплового потока, отводимого с поверхности тела из-за конвекции.

Уравнения (1) - (2) имеют вариационную формулировку, решение (1) с граничными условиями (2) и (3) эквивалентно нахождению в фиксированной момент времени минимума Функционала

Таблица 1 – Теплофизические свойства материала корпуса, внутренней емкости и крышки
Table 1 – Thermophysical properties of the housing material, inner container and lid

Параметры	Параметры
Модуль Юнга	1,94 *10 ⁵ МПа
Коэффициент Пуассона	0,3
Коэффициент теплового расширения	1,66 *10 ⁻⁵ 1/0С
Объемный модуль упругости	1,6167 *10 ⁵ МПа
Модуль сдвига	7,4615*10 ⁴ МПа
теплопроводность	16 Вт/м*0С
Плотность	7920 кг/м ³

Таблица 2 – Теплофизические свойства материала прокладки (резина)

Table 2 – Thermophysical properties of the gasket material (rubber)

Параметры	Параметры
Теплопроводность	0,16 Вт/м*0С
Удельная теплоемкость при постоянном давлении	1,0 Дж /кг * 0С

при постоянном давлении	
Относительная проницаемость	1,00

Таблица 3 – Теплофизические свойства воздуха во внутренних полостях

Table 3 – Thermophysical properties of air in internal cavities

Параметры	Параметры
Теплопроводность	0,026 Вт/м*0С
Плотность	1,1614 кг/м ³
Удельная теплоемкость	1007,0 Дж /кг * 0С

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} \left[k_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + k_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + k_{zz} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2 \left(w - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) T \right] dV + \quad (4)$$

$$+ \int_S q T dS + \int_S \frac{h}{2} (T_s - T_{ch})^2 dS.$$

Применяя функционал (4) и разбивая область тела на n-конечные элементы, создавая при этом m узлов, то получим степени свободы — это температуры узлов, которые образуют матрицу из векторов степеней свободы (узловых температур):

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООВОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

$$\{T\}T = \{T_1, \dots, T_m\}. \quad (5)$$

далее на одной грани ijk имеем тепловой поток плотность Q на другой грани ijj происходит конвективная теплоотдача Q_h . Внутри действует теплоисточники с мощностью w . Степенями свободы будут узловые температуры, образующие вектор $\{T\}T = \{T_i, T_j, T_k, T_l\}$, узловые тепловые нагрузки элемента образуют вектор $\{Q\}T = \{Q_i, Q_j, Q_k, Q_l\}$. температура в оболочке аппроксимируется с помощью линейных функций формы (пример: с двумя узлами):

$$T(x) = [N] \{T\} = [N_i \ N_j] \{T\}, \quad (6)$$

$$\text{где } N_i = x_j - x / x_j - x_i; \ N_j = x - x_i / x_j - x_i. \quad (7)$$

Матрица коэффициентов теплопроводности и матрица производных функций формы имеют соответственно вид

$$[D] = k_{xx}, \ [B] = 1/L [-1 \ 1] \quad (8)$$

где L = шаг сетки (узла).

Матрица теплопроводности (жесткости) элемента:

$$[K] = [k] = \int_v [B]^T [D] [B] dV + \int_s h [N]^T [N] dS =$$

$$= \frac{Ak_{xx}}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + Ah \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Также запишется матрицы теплоемкости элемента [2]. Векторы элементных узловых тепловых потоков, эквивалентны тепловому потоку Q и конвективной теплопередаче соответственно.

$$Q = \int_s q [N]^T dS = -QA \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (10)$$

$$Q = \int_s hT [N]^T dS = -AhT_{cp} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (11)$$

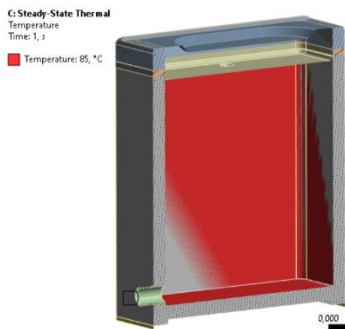


Рисунок 2 – Граничное условие для стенок внутренней емкости

Figure 2 – Boundary condition for the walls of the inner container

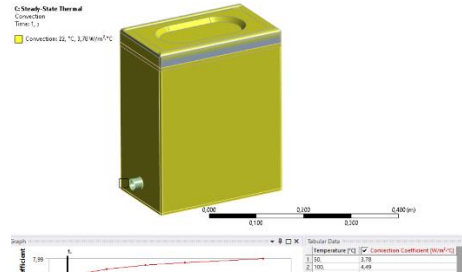


Рисунок 3 – Граничное условие для наружных стенок корпуса

Figure 3 – Boundary condition for the outer walls of the housing

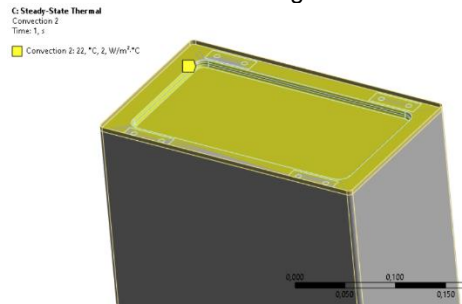


Рисунок 4 – Граничное условие для дна Корпуса
Figure 4 – Boundary condition for the bottom of the Hull

Для прочностной части задачи используются следующие граничные условия:

- узловые температуры, полученные из решения тепловой части задачи;
- закрепление опор модели по всем степеням свободы (рис. 5);
- гидростатическое давление, приложенное к стенкам внутренней емкости (рис. 6).

Действие силы тяжести моделировалось приложением инерционных узловых сил, рассчитываемые по ускорению свободного падения. Все контакты между телами считаются неизменяемыми (bonded-модель контакта) кроме контакта опор с корпусом, который рассчитывался по модели с трением (коэффициент трения – 0,15).

Для решения задачи использовались следующие типы конечных элементов:

- SHELL181 – для корпуса, внутренней емкости и крышки;
- SOLID187 и SOLID186 – для воздушных прослоек и уплотнения.

Все оболочки были разбиты на четырехугольные элементы, объемные тела – на призматические элементы и тетраэдры. Все КЭ имеют второй порядок аппроксимации (квадратичные элементы). Общий вид конечно-элементной модели показан на рисунке 7.

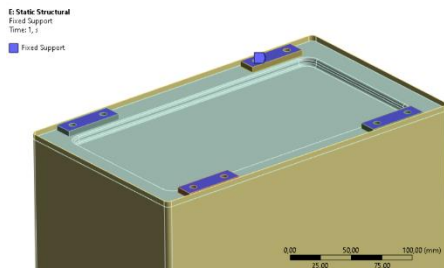


Рисунок 5 – Закрепление модели

Figure 5 – Fixing the model

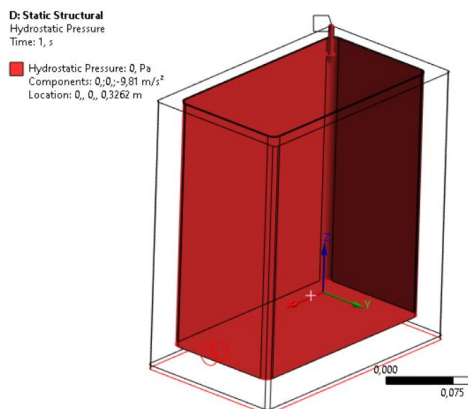


Рисунок 6 – Гидростатическое давление на стенках емкости

Figure 6 – Hydrostatic pressure on the walls of the container

Для плоских и объемных элементов, дифференцируя аппроксимирующие функции перемещений внутри элементов, находят деформации и по закону Гука вычисляет напряжения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате численного моделирования имеем поле температур, предоставленное на рис. 8. Поле температур распределилось с нижней части КУ (дно) равное 39°C далее температура повышается вплоть до верхней части и равняется 85°C . На рисунке 9 видно поле температур в воздушных прослойках равная 85°C . Распределение поля температур в резиновом уплотнении (прокладке) показано на рисунке 10.

На рисунке 11 представлено перемещения, вызванные тепловыми нагрузками во внутренней части нагревательного устройства, максимальные перемещения возникают в нижней емкости и равны $0,18\text{ мм}$ (растяжения) и наименьшие перемещения наблюдается в верхней части устройства равные $0,02\text{ мм}$ (сжатие), также наблюдаем на нижней наружной стенке значение также небольшое и равное $0,009\text{ мм}$.

На рисунке 12 представлено поле напряжений по Мизесу [9-12].

На рисунке 13 показаны температурные деформации для стенок корпуса и внутренней емкости изделия и на рисунке 14 – Суммарная сила реакции в опорах изделия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ расчетов нагревательного устройства показал, что при максимальной температуре поле напряжений сформировалось в определенной области, где максимальные перемещения возникают в нижней емкости и равны $0,18\text{ мм}$ (растяжение) и наименьшие перемещения наблюдается в верхней части устройства равные $0,02\text{ мм}$ (сжатие), также наблюдаем на нижней наружной стенке значение равное $0,009\text{ мм}$.

Результаты расчетов показали, что значения по допускаемым напряжениям и деформациям не превышают предельных значений.

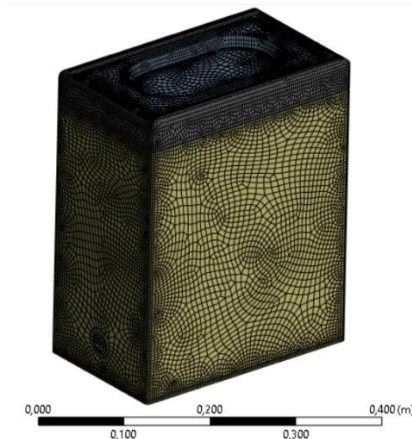


Рисунок 7 – Общий вид конечно-элементной модели
Figure 7 – General view of the finite element model

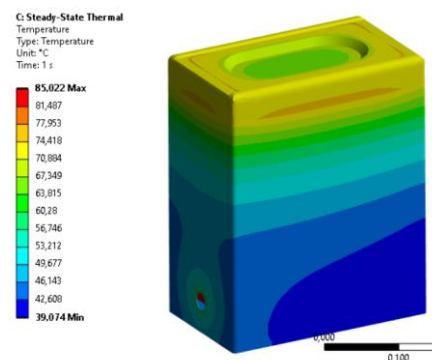


Рисунок 8 – Поле температуры на наружных стенках корпуса изделия

Figure 8 – Temperature field on the outer walls of the product body

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООВОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

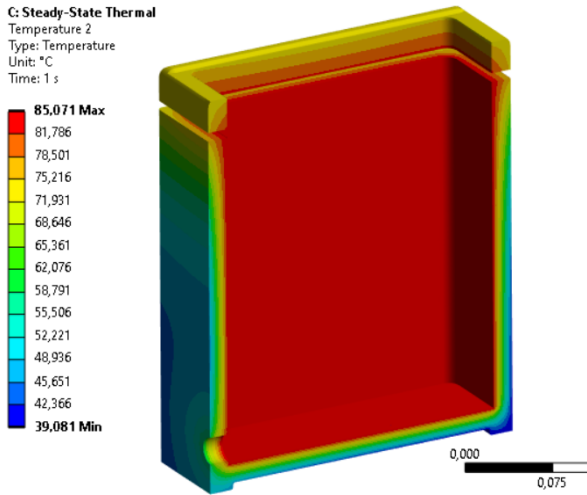


Рисунок 9 – Поле температуры в воздушных прослойках

Figure 9 – Temperature field in air layers

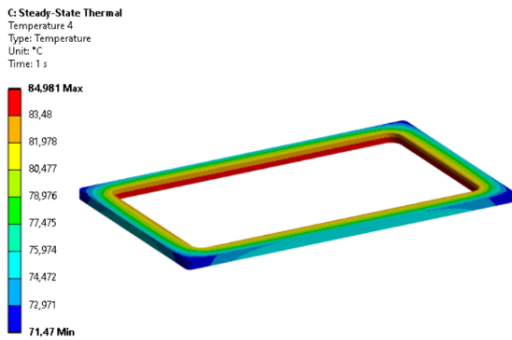


Рисунок 10 – Поле температуры в уплотнении

Figure 10 – Temperature field in the seal

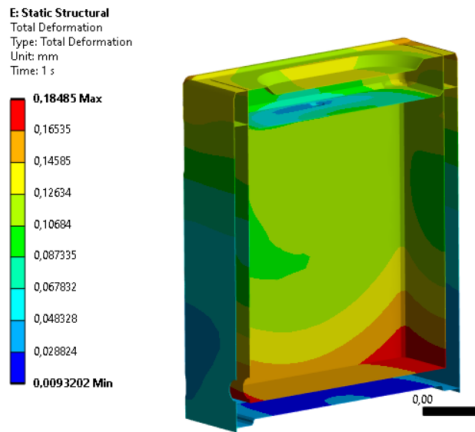


Рисунок 11 – Перемещения для стенок корпуса и внутренней емкости изделия

Figure 11 – Movements for the walls of the housing and the inner container of the product

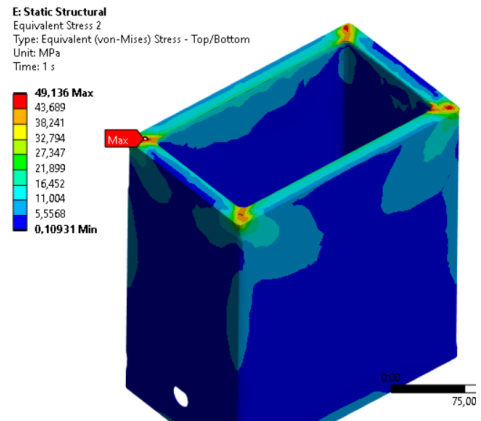


Рисунок 12 – Эквивалентные (по Мизесу) напряжения для стенок корпуса и внутренней емкости изделия

Figure 12 – Equivalent (according to Mises) stresses for the walls of the housing and the internal capacity of the product

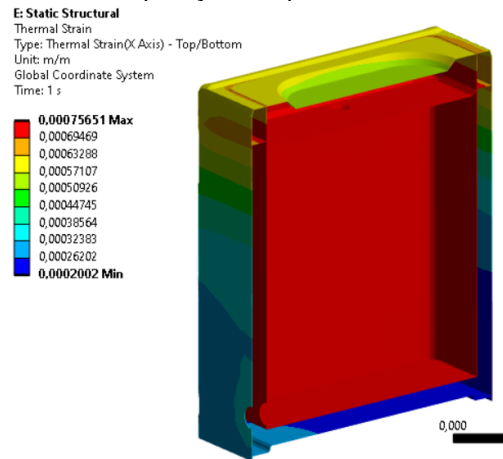


Рисунок 13 – Температурные деформации для стенок корпуса и внутренней емкости изделия

Figure 13 – Temperature deformations for the walls of the body and the inner container of the product

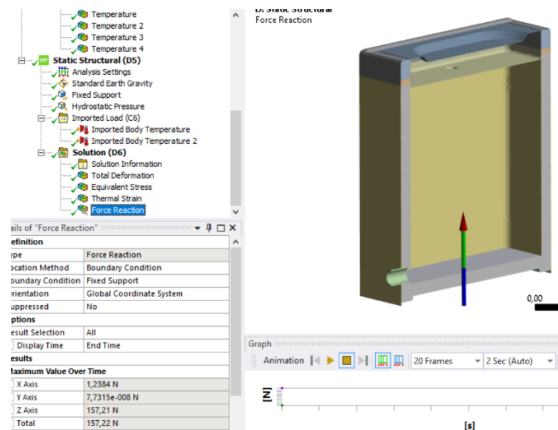


Рисунок 14 – Суммарная сила реакции в опорах изделия

Figure 14 – Total reaction force in the supports of the product

Наибольшие концентрации напряжений по Мизесу на стенках корпуса и внутренней ёмкости показали достаточно малые значения по прочности 49,136 МПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еськова А. В. Математическое моделирование устройств генерирования тепловой энергии на основе электромеханического преобразователя с разделенными нагревательными элементами: дис. ... канд. техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре, 2006. 181 с.
2. Теория и реализация задач вычислительной математики в пакете MathCad: учебное пособие / сост. А.И. Кочегуров, Е.А. Кочегурова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 135 с.
3. Design and Structural Factors' Influence on the Fatigue Life of Steel Products with Additive Manufacturing / N. Kazantseva, M. Il'nikh, V. Kuznetsov, Y. Koemets, K. Bakhrunov, M. Karabanalov //Materials 2023, 16(23), 7315; <https://doi.org/10.3390/ma16237315> - 24 Nov 2023.
4. Бруйка В.А. Инженерный анализ в Ansys Workbench: Учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Аведянов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 271 с.
5. В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, В.А. Цветков. Введение в расчетную платформу Ansys Workbench: Лабораторные работы. Часть 1 – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 46 с.
6. Денисов, М. А. Компьютерное проектирование. ANSYS: [учебное пособие] / М. А. Денисов Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2014. – 77 с.
7. Скворцов, Ю. В. Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твёрдого тела [Электронный ресурс]: интерактивное. мультимедийное. пособие / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (Нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (9,1 Мб). – Самара, 2011. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
8. Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А. ANSYS в руках инженера. Практическое

руководство, Изд-во Либроком, 2015. – 272 с.

9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. 248 с.

10. Рабинович М. Х. Прочность, температура, время. – М.: Наука, 1968. 160 с.

11. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.

12. Ильющин А. А. Механика сплошной среды. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 310 с.

Информация об авторах

К. К. Бахрунов – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Естественнонаучные дисциплины» инженерного факультета Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова.

А. Н. Павлов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолето- и вертолётостроения» машиностроительного факультета Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления.

Т. И. Некипелова – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» инженерного факультета Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова.

Information about the authors

K. K. Bakhrunov – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of "Natural Science Disciplines" of the Faculty of Engineering of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov.

T. I. Nekipelova - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of "Natural Science Disciplines" of the Engineering Faculty of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippova.

A. N. Pavlov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Aircraft and Helicopter Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, East Siberian State University of Technology and Management

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 25 мая 2024; одобрена после рецензирования 20 сентября 2024; принята к публикации 04 октября 2024.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

The article was received by the editorial board on 25 May 2024; approved after editing on 20 Sep 2024; accepted for publication on 04 Oct 2024.