

Рис. 4. Общий вид амплитудно-частотной характеристики звука, издаваемого абразивной чашей №6 в окне программы Audacity при шаге частоты 86,1 Гц и прямоугольном окне (без сглаживания)

Заключение

1. Интегральный акустический метод пригоден для анализа целостности и прочности изделий сложной формы, выполненных из композиционных материалов.
2. Результаты испытаний серии образцов следует сравнивать с показателями заведомо доброкачественного образца, оценочные параметры которого принимаются в качестве пороговых.
3. Несмотря на то, что метод является достаточно помохоустойчивым для определенных диапазонов частот, амплитудно-частотная характеристика звукового сигнала существенно зависит от силы и направления начального удара, что приводит к трудностям при реализации метода на практике.
4. Поскольку сигнал анализируется по всему временному промежутку, то в рамках анализа не выявляются параметры, характеризующие его затухание.
5. Таким образом, в случае контроля изделий сложной геометрической формы при использовании ИМСК или РМВК, возникает необходимость в введении интегрального показателя, усредняющего множественность резонансных частот. Этот параметр также должен быть инвариантным относительно разброса геометрических размеров объектов контроля и инвариантным относительно изменения силы начального удара.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практик. пособие / И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк, 1991 — 283 с: ил.
2. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. – Измерения, контроль, испытания и диагностика. Т. III-7 / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов [и др.]; под общ. ред. В.В. Клюева. – 464 с.
3. ГОСТ Р 52710-2007 Инструмент абразивный. Акустический метод определения твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн. Введен 13.04.2007 – М.: Стандартиформ, 2007 – 21 с.
4. НПП «Интерприбор». Приборы неразрушающего контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.interpribor.ru>. – Дата доступа: 16.08.2012.
5. ООО «Контроль. Измерение. Диагностика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.defectoscop.ru>. – Дата доступа: 16.08.2012.
6. Ционенко, Д.А. Определение характеристик качества абразивных чаш для контроля в процессе их изготовления / Д.А. Ционенко, И.В. Дубень / Материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24-25 ноября 2011 г., Барановичи, Респ. Беларусь / Редкол.: А.В. Никишова (гл. ред.) [и др.] – Барановичи: РИО БарГУ, 2011.

Материал поступил в редакцию 04.12.12

DUBEN I.V., GRIDYUSHKO M.I., TSIONENKO D.A. Integral method of free oscillations to control the integrity and strength of abrasive cups

The authors propose a method for determining the integrity and strength goods of complex shape, made of composite materials. The method is based on the analysis of the spectrum of natural oscillations of the object of control. The basic parameters that let to reliably establish the difference in characteristics of the object of control are determined.

УДК 539.3

Хвусевич В.М., Веремейчик А.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРА ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ, МЕХАНИЧЕСКОМ И РАДИАЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ

Введение. Основу любого ядерного реактора составляет тепло-выделяющий элемент (ТВЭЛ) цилиндрической формы. Он работает в

условиях радиационного распухания, а также подвержен температурной нагрузке. От надежной работы ТВЭЛОВ зависит работоспособ-

Хвусевич Виталий Михайлович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Веремейчик Андрей Иванович, доцент кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

ность всего реактора, поэтому упругая задача с терморadiационным воздействием приобретает особое значение.

1. Постановка задачи. Рассматривается бесконечно длинный однородный цилиндр, который подвергается воздействию радиационной, температурной нагрузки и внешнего давления. Расчетная схема приведена на рисунке 1. Требуется исследовать его напряженно-деформированное состояние (НДС).

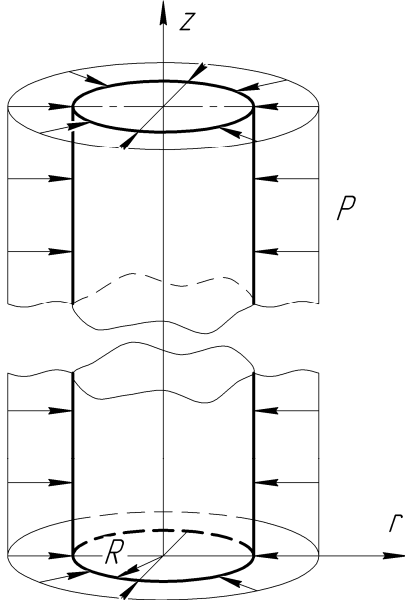


Рис. 1. Расчетная схема цилиндра

В связи со спецификой заданных нагрузок и с учетом физической и геометрической симметрии НДС цилиндра можно оценить, реализовав осесимметричную задачу теории упругости.

Дифференциальное уравнение равновесия имеет вид:

$$\sigma_r - \sigma_\theta + r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0, \quad (1)$$

где σ_r, σ_θ - радиальное и касательное напряжение, r - переменный радиус.

Граничные условия задачи: $u_r = 0$ при $r=0$, $\sigma_r = -P$ при $r=R$, где P - внешнее давление, R - наружный радиус цилиндра.

Эмпирическая функция радиационного распухания, согласно [1], имеет вид:

$$S(T(r), t) = 4,9 \cdot 10^{-51} \cdot (\Phi \cdot t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{15490}{T} - \frac{5,98 \cdot 10^6}{T^2}}, \quad (2)$$

где t - время, Φ - нейтронный поток, T - температурное поле как функция координаты:

$$T = T_s + \frac{q_v}{4\lambda} (R^2 - r^2), \quad (3)$$

T_s - температура на наружной поверхности, q_v - объемное тепловыделение, λ - коэффициент теплопроводности материала.

Уравнения обобщенного закона Гука при температурном и радиационном нагружении:

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)) + \alpha \cdot T(r) + \frac{S(T(r), t)}{3}, \\ \epsilon_\theta &= \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)) + \alpha \cdot T(r) + \frac{S(T(r), t)}{3}, \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)) + \alpha \cdot T(r) + \frac{S(T(r), t)}{3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где α - коэффициент линейного расширения материала.

Геометрические соотношения Коши, связывающие перемещения и деформации:

$$\epsilon_r = \frac{du_r}{dr}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \quad \epsilon_z = 0. \quad (5)$$

2. Методика решения и некоторые результаты. Выразим компоненты напряжений рассматриваемой задачи через перемещения:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \left((1-\nu) \cdot \frac{du_r}{dr} + \nu \cdot \frac{u_r}{r} - (1+\nu) \cdot \left(\alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \left((1-\nu) \cdot \frac{u_r}{r} + \nu \cdot \frac{du_r}{dr} - (1+\nu) \cdot \left(\alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1-2\nu)} \cdot \left(\frac{\nu}{1+\nu} \cdot \left(\frac{du_r}{dr} + \frac{u_r}{r} \right) - \left(\alpha \cdot T + \frac{S}{3} \right) \right).$$

Решая совместно уравнения (1, 6), получим дифференциальное уравнение равновесия в перемещениях.

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu} \left(\alpha \cdot \frac{dT}{dr} + \frac{1}{3} \frac{dS}{dr} \right), \quad (7)$$

где ν - коэффициент Пуансона.

Решение полученного неоднородного уравнения разыскивается в виде суммы \bar{u}_r общего решения однородного уравнения

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = 0$$

и частного решения u_r^* неоднородного уравнения (7):

$$u_r = \bar{u}_r + u_r^*. \quad (8)$$

Общее решение, удовлетворяющее однородному уравнению, имеет вид:

$$\bar{u}_r = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r}, \quad (9)$$

Для определения частного решения (6) применен принцип суперпозиции: $u_r^* = u_{r1}^* + u_{r2}^*$, где u_{r1}^*, u_{r2}^* - частные решения ДУ

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = \alpha \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{dT}{dr}, \quad (10)$$

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{dS}{dr} \quad (11)$$

соответственно.

Решение u_{r1}^* с учетом того, что $\frac{dT}{dr} = -2r \cdot \frac{q_v}{4\lambda}$ и

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = -2\alpha \cdot \frac{q_v}{4\lambda} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot r, \quad (12)$$

разыскиваем в виде: $u_{r1}^* = ar^3 + br^2 + cr + d$, где a, b, c, d - неизвестные постоянные. Подставляя производные от u_{r1}^* в (11) получим, что $a = -\frac{1}{16} \cdot \frac{\alpha q_v}{4\lambda} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu}$, $b=0, c=0, d=0$. Окончательно:

$$u_{r1}^* = -\frac{1}{16} \cdot \frac{\alpha q_v}{\lambda} \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot r^3. \quad (13)$$

Так как

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dr} &= -4,9 \cdot 10^{-51} \cdot (\Phi \cdot t)^{1,71} \cdot 10^{\frac{15490}{T_s+273+\frac{q_v}{4\lambda}(R^2-r^2)} - \frac{5,98 \cdot 10^6}{\left(T_s+273+\frac{q_v}{4\lambda}(R^2-r^2)\right)^2}} \times \\ &\times \ln 10 \cdot \frac{q_v}{4\lambda} r \times \left[15490 \times \frac{\left[\left(T_s + 273 + \frac{q_v}{4\lambda} \cdot (R^2 - r^2) \right) \right]}{\left(T_s + 273 + \frac{q_v}{4\lambda} \cdot (R^2 - r^2) \right)^3} - \right. \\ &\left. - \frac{2 \cdot \left(T_s + 273 + \frac{q_v}{4\lambda} \cdot (R^2 - r^2) - 5,98 \cdot 10^6 \right)}{\left(T_s + 273 + \frac{q_v}{4\lambda} \cdot (R^2 - r^2) \right)^3} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

то подобрать частное решение (11) ввиду сложности производной в аналитическом виде не удалось.

Проведем аппроксимацию функции S полиномом 3-й степени $y = A + Br + Cr^2 + Dr^3$. Определение постоянных A, B, C, D ввиду громоздкости математических вычислений проводилось с учетом характеристик для материала ОХ16Н15МЗБ, где принято $\Phi = 2,81 \cdot 10^{19}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$, $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, $\nu = 0,3$, $E = 1,5 \cdot 10^{11}$ Па, $T_S = 700^\circ \text{C}$, $\lambda = 12$ Вт/(м·град), $q_V = 2,234 \cdot 10^8$ Вт/м 3 , $t=1000$ ч. [1]. Окончательно получена следующая зависимость аппроксимирующей функции от радиуса: $y = 0,002267 + 0,005185r + 75,309r^2 + 7316r^3$. На рисунке 2 показано соответствие зависимостей.

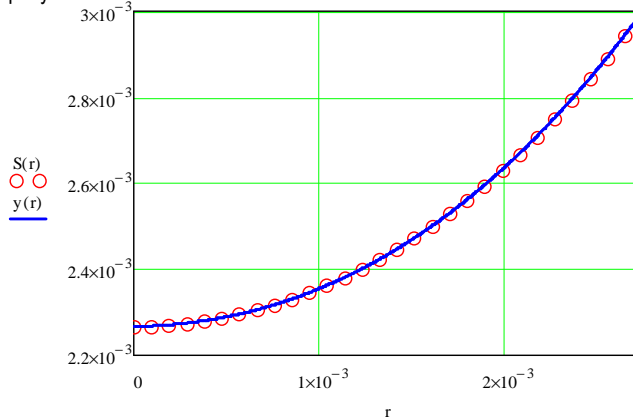


Рис. 2. Зависимость функции радиационного распухания $S(r)$ и ее аппроксимирующей функции $y(r)$

Дифференциальное уравнение (11) с учетом аппроксимации принимает вид:

$$\frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_r}{dr} - \frac{u_r}{r^2} = 0,005185 + 150,618r + 21948r^2. (15)$$

Частное решение (15) ищем в виде: $u_{r2}^* = A_1 + B_1 r + C_1 r^2 + D_1 r^3 + E_1 r^4$. Коэффициенты принимают следующие значения: $A_1 = 0$, $B_1 = 0$, $C_1 = 0,00172833$, $D_1 = 18,82725$, $E_1 = 1463,2$. С учетом того, что $u_{r1}^* = -39,54379r^3$, окончательное решение (7) имеет вид:

$$u_r = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} + 0,00172833r^2 - 20,71654r^3 + 1463,2r^4. (16)$$

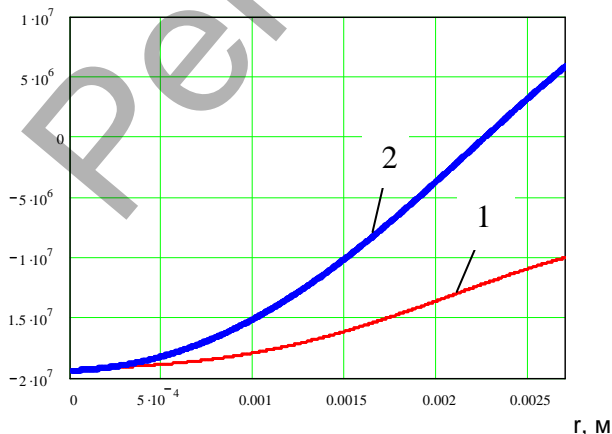
Так как с учетом граничных условий $u_r = 0$ при $r = 0$, $\sigma_r = -P = -10$ МПа при $r=R$, $u_r = 0$, $C_2 = 0$, $C_1 = 0,02255126$.

Окончательно:

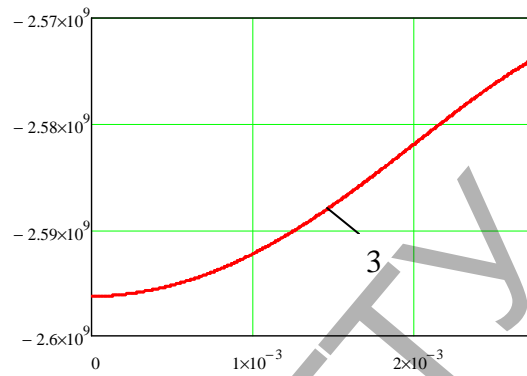
$$u_r = 0,02255126r + 0,00172833r^2 - 20,71654r^3 + 1463,2r^4. (17)$$

Для момента времени $t=1000$ часов получены зависимости для напряжений, которые приведены на рисунке 3.

σ , Па



σ , Па



г, м

1 - σ_r , 2 - σ_θ , 3 - σ_z

Рис. 3. Зависимость напряжений от радиуса

Получены значения компонент напряжения $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ и деформаций $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ в зависимости от координаты. Исследована их зависимость от времени облучения и свойств материала. Типичная зависимость σ_r для различных сроков службы твэла приведена на рис. 4.

σ_r , Па

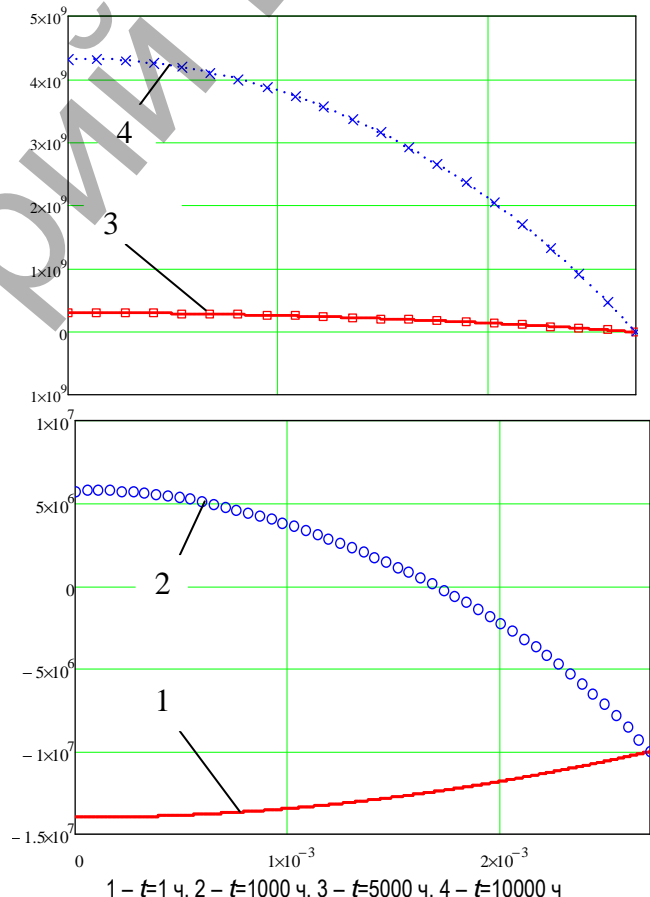


Рис. 4. Зависимость радиальных напряжений от радиуса для различных моментов времени

Анализ полученных графиков показывает, что с течением времени влияние радиационного воздействия на радиальные напряжения значительно возрастает.

Кроме того, проведено исследование влияния температуры и радиационного распухания на напряжения в отдельности. Типичная зависимость радиальных напряжений от температуры и радиации в момент времени $t=1000$ часов при заданных граничных условиях приведена на рис. 5.

σ_r , Па

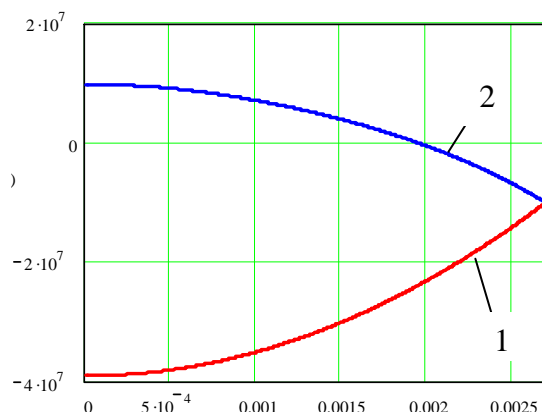


Рис. 5. Типичная зависимость радиальных напряжений от температуры (1) и радиации (2)

Ввиду отсутствия аналитических решений данной задачи, сравнение проводилось с результатами решения термоупругой задачи при отсутствии радиационного воздействия [2]. Согласно [2], перемещения и напряжения при температурном нагружении определяются по формулам:

$$u_r = \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{r} \int_0^r T(r) r dr + C_1 r + \frac{C_2}{r},$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr + \frac{E}{1+\nu} \cdot \left(\frac{C_1}{1-2\nu} - \frac{C_2}{r^2} \right), \quad (18)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \cdot \frac{1}{r^2} \int_0^r T(r) r dr + \frac{\alpha E \cdot T(r)}{1-\nu} + \frac{E}{1+\nu} \cdot \left(\frac{C_1}{1-2\nu} + \frac{C_2}{r^2} \right).$$

HVISEVICH V.M., VEREMEJCHIK A.I. Research intense the deformed condition of the continuous cylinder at temperature, mechanical and radiation loading

The solution of a task on determination of tension and deformations of the uniform infinitely long cylinder which is exposed to influence of radiation, temperature loading and external pressure is considered. The system of the differential equations of balance in movements is received and analytically solved. For the fixed value of time values a component of tension and deformations depending on coordinate are found. Their dependence on time of radiation and properties of a material is investigated.

УДК 539.216.2

Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Веремейчик А.И., Гарбачевский В.В.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Введение. С созданием электронной, лазерной, плазменной технологий начали развиваться методы, основанные на использовании локальных высокотемпературных источников нагрева [1–3], в результате были разработаны технологические процессы упрочнения изделий, которые в настоящее время получили широкое применение. Требуемое качество деталей достигается путем изменения физико-механических свойств поверхностного слоя при воздействии на материал высокотемпературного источника тепла. В данном случае уменьшается применение дорогостоящих материалов, на порядок увеличивается износостойкость и долговечность изнашиваемых деталей. Особенностью таких процессов является отсутствие коробления деталей. Воздействие потока энергии на упрочняемые участки можно осуществлять как перемещением локального источника тепла, так и самой обрабатываемой детали, а это дает возможность автоматизировать технологические процессы и управлять ими.

Перемещение u_r должно обращаться в нуль при $r = 0$, поэтому в (18) отбросим член, содержащий C_2 . При $r = R$: $\sigma_r = 0$,

поэтому $C_1 = \frac{\alpha \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{1-\nu} \cdot \frac{1}{R^2} \int_0^R T(r) r dr$. В этом случае

$$u_r = \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \alpha \cdot \left[(1-2\nu) \cdot \frac{r}{R^2} \int_0^R T(r) r dr + \frac{1}{r} \int_0^r T(r) r dr \right].$$

В данной задаче, при $T(r) = 1006,929 - 4,6546 \cdot 10^6 r^2$, получим: $u_r = 0,020843r - 34,574r^3$. Учитывая $S=0$ в (7), получим следующее решение: $u_r = 0,02084292r - 34,57381r^3$. Это подтверждает правильность проведенных расчетов.

Заключение. Реализована осесимметричная краевая задача теории упругости для однородного длинного цилиндра, который подвергнут радиационному, температурному и механическому воздействиям.

Полученное НДС твэла позволяет оптимизировать его геометрические и физические параметры.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С. Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Мн., 1984.
- Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер – М., 1979.

Материал поступил в редакцию 23.11.12

Сазонов Михаил Иванович, д.т.н., профессор кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Гарбачевский Виталий Владимирович, магистрант кафедры сопротивления материалов и теоретической механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.