

А.С. Кобец, д-р эконом. наук, профессор
(ДГАУ),

А.И. Волошин, чл.-корр. НАН Украины, д-р техн. наук, профессор,
Т.Е. Твердохлеб, инженер, научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины),

С.П. Сокол, ст. преподаватель, декан,
И.Н. Цаниди, инженер, ассистент
(ДГАУ)

РЕШЕНИЕ СВЯЗАННОЙ ЗАДАЧИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ СО СЛОЖНОЙ ФОРМОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Аннотация. Для виброизоляторов типа ВР, имеющих форму тел вращения и сложную свободную поверхность, рассматривается связанная задача термовязкоупругого поведения при длительных циклических нагрузках: излагается расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) и температура диссипативного разогрева в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой. Решение задач такого рода представляет значительный интерес при прогнозировании долговечности элементов типа ВР, используемых в качестве виброизоляторов технологических машин.

Ключевые слова: термовязкоупругость, циклические нагрузки, виброизоляторы типа ВР, определение НДС

A.S. Kobets, D. Sc.(Ec.), Professor
(DSAU),

A.I. Voloshin, Corresponding Member NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,
T.Ye. Tverdokhleba, Engineer, Researcher
(IGTM NAS of Ukraine),

S.P. Sokol, Senior Teacher, Dean,
I.N. Tsanidy, Engineer, Doctoral Student
(DSAU)

THERMOMECHANICAL BEHAVIOR RELATED TASKS DECISION OF VIBRATION ISOLATORS WITH FREE SURFACE OF COMPLEX SHAPE

Abstract. For type VR vibration isolators shaped as bodies of rotation and having complex free surface thermoviscoelastic behavior related tasks are considered at long cyclic loading: we describe calculation of the stress-strain state and the temperature of dissipative heating under convective heat transfer with the environment. Solution of such problems is of great interest in predicting the durability of type VR elements when used as vibration isolators of technological machines.

Keywords: thermoviscoelasticity, cycling loads, type VR vibration isolators, strain-stress state determination

При математическом описании термомеханического поведения эластомерных конструкций и решении соответствующих краевых задач возникают трудности математического характера, связанные с необходимостью исследования нелинейных систем дифференциальных уравнений в частных производных. Этим объясняется отсутствие точных аналитических решений задач термовязкоупругости для тел сложной формы.

В определённой степени указанные трудности преодолеваются путём использования метода конечных элементов (МКЭ), уже нашедшего широкое применение при решении различных задач механики сложной среды. В работах [1-3], в частности, предложены методы решения квазистатических и динамических задач,

основанные на использовании метода конечных элементов в сочетании с методом пошагового интегрирования по времени. Они позволяют исследовать термо-механическое поведение сложных конструкций в рамках неупрощённой постановки задачи и циклическом нагружении.

В настоящей работе метод конечных элементов используется для расчёта напряжённо-деформированного состояния и температуры диссипативного разогрева эластомерных конструкций при циклических нагрузках.

Рассматривается осесимметричная задача термовязкоупругости для тела вращения произвольного меридионального сечения, находящегося в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой. Предполагается, что по части поверхности тела Σ приложена осесимметричная циклическая нагрузка $\vec{t}_n(t_{rn}, t_{zn})$, а по остальной части поверхности заданы циклические перемещения $\vec{u} = (u, w)$.

Для гармонического деформирования в случае пренебрежения быстротатующими переходными процессами данная задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений [1, 4, 5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} + \omega^2 \rho u &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{zr}}{r} + \omega^2 \rho w &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\lambda}{a} \frac{\partial T}{\partial t} - D$$

при начальных и граничных условиях

$$T = T_0(r, z) \quad (t = t_0), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} t_{rn} &= \sigma_{rr} \ell_r + \sigma_{zr} \ell_z \\ t_{zn} &= \sigma_{zr} \ell_r + \sigma_{zz} \ell_z \end{aligned} \quad \text{на поверхности } \Sigma, \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -\alpha(T - \theta) \quad \text{на поверхности } \Sigma,$$

где u, w – радиальная и осевая комплексные амплитуды вектора перемещений;

σ – комплексные компоненты тензора напряжений;

ω – круговая частота;

ρ – плотность материала;

T – осреднённая за цикл температура;

λ, a, α – соответственно коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и теплоотдачи;

D – осреднённая за цикл диссипативная функция;

θ – температура окружающей среды;

ℓ_r и ℓ_z – направляющие косинусы внешней нормали \vec{n} к поверхности тела Σ .

Для осесимметричной задачи осреднённая за цикл диссипативная функция D определяется по формуле [4]

$$D = \frac{\omega}{2} \left[2G \left(|\varepsilon_{rr}|^2 + |\varepsilon_{zz}|^2 + |\varepsilon_{\varphi\varphi}|^2 + 2|\varepsilon_{zr}|^2 \right) + \frac{K_2 - 2G_2}{3} \left(|\varepsilon_{rr} + \varepsilon_{zz} + \varepsilon_{\varphi\varphi}| \right)^2 \right] \quad (4)$$

где ε – комплексные амплитуды компонент тензора деформаций;
 G_2 и K_2 – мнимые части комплексных модулей сдвига

$$G(\omega, T) = G_1(\omega, T) + iG_2(\omega, T)$$

и объёмного расширения

$$K(\omega, T) = K_1(\omega, T) + iK_2(\omega, T).$$

Решаемая система уравнений (1) представляет собой сложную нелинейную систему дифференциальных уравнений. Для её решения используется метод конечных элементов в сочетании с методом пошагового интегрирования по времени.

Систему (1) с соответствующими граничными условиями можно заменить эквивалентными им вариационными уравнениями.

$$\delta \mathfrak{D} = 0, \quad \delta I = 0, \tag{5}$$

где

$$\begin{aligned} \mathfrak{D} = & \frac{1}{2} \int_V \left[A_1 (\varepsilon_{rr}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2) + A_2 \varepsilon_{zr}^2 + A_3 (\varepsilon_{rr} \varepsilon_{zz} + \varepsilon_{rr} \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz} \varepsilon_{\varphi\varphi}) \right] dv - \\ & - \frac{\rho \omega^2}{2} \int_V (u^2 + w^2) dv - \int_{\Sigma} (t_{rn} u + t_{zn} w) d\Sigma, \\ I = & \frac{1}{2} \int_V \left\{ \lambda \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] + 2 \int_{T_0}^T \frac{\lambda}{a} \frac{\partial T}{\partial t} dT - 2DT \right\} dv + \frac{1}{2} \int_{\Sigma} \alpha (T - 2\theta) T d\Sigma, \\ & A_1 = \frac{K + 4G}{3}, \quad A_2 = 4G, \quad A_3 = \frac{2(K - 2G)}{3}. \end{aligned}$$

Для решения вариационной задачи (5) область меридионального сечения тела делится N узловыми точками на M треугольных элементов и предполагается, что в пределах каждого треугольника перемещения и температура изменяются линейно

$$\begin{aligned} w &= c_1 + c_2 z + c_3 r, \\ u &= c_4 + c_5 z + c_6 r, \\ T &= d_1 + d_2 z + d_3 r. \end{aligned} \tag{6}$$

Принимая перемещения вершин треугольного элемента за основные неизвестные и реализуя технику конечных элементов, для определения комплексных амплитуд компонент вектора перемещений в узловых точках можно получить систему $2N$ линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial w_j} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial \mathfrak{D}_m}{\partial w_j} = 0, \\ \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial u_j} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial \mathfrak{D}_m}{\partial u_j} = 0. \end{aligned} \tag{7}$$

Для треугольного элемента, сторона ij которого совпадает с границей тела, выражения производных имеет вид

$$\begin{aligned}\frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial w_i} &= a_{ii}^{(m)} w_i + b_{ii}^{(m)} u_i + a_{ij}^{(m)} w_j + b_{ij}^{(m)} u_j + a_{ik}^{(m)} w_k + b_{ik}^{(m)} u_k + f_i^{(z,m)}; \\ \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial u_i} &= c_{ii}^{(m)} w_i + d_{ii}^{(m)} u_i + c_{ij}^{(m)} w_j + d_{ij}^{(m)} u_j + c_{ik}^{(m)} w_k + d_{ik}^{(m)} u_k + f_i^{(z,m)},\end{aligned}\quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}a_{ij}^{(m)} &= \iint_{\Delta m} \left(2A_1 b_i b_j + \frac{A_2}{2} c_i c_j \right) r dr dz - 2\rho\omega^2 R_{ij}^{(m)}, \\ b_{ij}^{(m)} &= \iint_{\Delta m} \left(A_3 b_i a_j + A_3 z b_i b_j + r \left(2A_3 b_i c_j + \frac{A_2}{2} c_i b_j \right) \right) dr dz, \\ f_i^{(z,m)} &= -\frac{\ell_{ij}}{6} \text{sign} F_{\Delta m} \left[t_{z_{in}} (3r_i + r_j) + t_{z_{in}} (r_i + r_j) \right], \\ c_{ij}^{(m)} &= \iint_{\Delta m} \left(A_3 a_i b_j + A_3 z b_i b_j + r \left(2A_3 c_i b_j + \frac{A_2}{2} b_i c_j \right) \right) dr dz, \\ d_{ij}^{(m)} &= \iint_{\Delta m} \left[2A_1 b_i b_j \frac{z^2}{r} + 2A_1 (a_i b_j + b_i a_j) \frac{z}{r} + 2A_1 a_i a_j \frac{1}{r} + (2A_1 + A_3) (b_i c_j + b_j c_i) z + \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2}{2} b_i b_j z + 2(2A_1 + A_3) c_i c_j r + (2A_1 + A_3) (a_i c_j + c_i a_j) \right] dr dz - 2\rho\omega^2 R_{ij}^{(m)}, \\ a_i &= \frac{1}{2F_{\Delta m}} (z_j r_k - z_k r_j), \quad b_i = \frac{1}{2F_{\Delta m}} (r_j - r_i), \\ c_i &= \frac{1}{2F_{\Delta m}} (z_k - z_j), \quad \ell_{ij} = \sqrt{(r_i - r_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \\ F_{\Delta m} &= \frac{1}{2} \left[z_i (r_i - r_k) + z_j (r_k - r_i) + z_k (r_i - r_j) \right],\end{aligned}\quad (9)$$

$r_i, z_i, r_j, z_j, r_k, z_k$ – коэффициенты вершин треугольного элемента.

Остальные соотношения получаются из (9) путём циклической перестановки индексов.

Записывая производную по времени в конечных разностях

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{T_i(t + \Delta t) - T_i(t)}{\Delta t},$$

для определения температуры в узловых точках в случае, когда с границей области совпадает одна сторона треугольника, получаем систему линейных алгебраических уравнений

$$\frac{\partial I}{\partial T_i} = \sum_{m=1}^M \frac{\partial I_m}{\partial T_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned}\frac{\partial I_m}{\partial T_i} &= Q_{ii}^{(m)} T_i(t + \Delta t) + Q_{ij}^{(m)} T_j(t + \Delta t) + Q_{ik}^{(m)} T_k(t + \Delta t) - \\ &\quad - \frac{\lambda_{\Delta}}{\Delta t a_{\Delta}} \left[R_{ii}^{(m)} T_i(t) + R_{ij}^{(m)} T_j(t) + R_{ik}^{(m)} T_k(t) \right] - A_{ij}^{(m)} \theta_i - B_{ij}^{(m)} \theta_j - R_{ik}^{(m)} H_{ii}^{(m)},\end{aligned}$$

$$Q_{ij}^{(m)} = \lambda_{\Delta} D_{ij}^{(m)} + \frac{\lambda_{\Delta} R_{ii}^{(m)}}{\alpha_{\Delta} \Delta t} + A_{ij}^{(m)}, \quad Q_{ji}^{(m)} = \lambda_{\Delta} D_{ij}^{(m)} + \frac{\lambda_{\Delta} R_{ij}^{(m)}}{\alpha_{\Delta} \Delta t} + B_{ij}^{(m)},$$

$$Q_{ik}^{(m)} = \lambda_{\Delta} D_{ik}^{(m)} + \frac{\lambda_{\Delta} R_{ik}^{(m)}}{\alpha_{\Delta} \Delta t},$$

$$H_{ij}^{(m)} = \iint_{\Delta m} (a_i + b_j z + c_j r) r dr dz,$$

$$D_{ij}^{(m)} = \iint_{\Delta m} (b_i b_j + c_i c_j) r dr dz,$$

$$A_{ij} = \frac{\ell_{ij}}{10} \text{sign} F_{\Delta m} \left[\alpha_i \left(2r_i + \frac{r_j}{2} \right) + \alpha_j \left(\frac{r_i}{2} + \frac{r_j}{3} \right) \right],$$

$$B_{ij} = \frac{\ell_{ij}}{10} \text{sign} F_{\Delta m} \left[\alpha_i \left(\frac{r_i}{2} + \frac{r_j}{2} \right) + \alpha_j \left(\frac{r_i}{3} + \frac{r_j}{2} \right) \right],$$

$D_{\Delta m}$ – осреднённая по треугольнику диссипативная функция;

λ_{Δ} , α_{Δ} – осреднённые по треугольнику коэффициенты теплопроводности и температуропроводности;

α_i , α_j , θ_i , θ_j – соответственно значения коэффициентов теплоотдачи и температуры окружающей среды в точках i , j .

Решение системы (10) относительно неизвестных $T_i(t + \Delta t)$ даёт распределение температуры в теле для момента времени $(t + \Delta t)$ при известном её распределении в момент t .

Алгоритм численного решения рассмотренной задачи построен на основе пакета прикладных программ, разработанного в Институте механики им. С.П. Тимошенко [3]. В соответствии с алгоритмом исходные данные для решения поставленной задачи необходимо должны отражать в полной мере размеры и конфигурацию меридионального сечения, граничные условия, а также теплофизические и механические свойства материала.

Контур меридионального сечения аппроксимируется системой прямоугольных участков. В соответствии с этим поперечное сечение его делится на четырёхугольные подобласти. В качестве исходной информации о геометрии сечения и разбивке его на треугольные элементы задаётся количество четырёхугольных подобластей, координаты их вершин и количество участков, на которые равномерно разбиваются соседние стороны четырёхугольников. Разбивка области на треугольные элементы производится путём деления каждой подобласти на микрочетырёхугольники, каждый из которых затем делится на четыре треугольника. Вершины треугольных элементов нумеруются по всему сечению, и определяются их координаты.

По заданному начальному распределению температуры вычисляют соответствующие механические характеристики материала и из решения системы (7) определяются перемещения узловых точек. По найденным перемещениям вычисляются деформации, напряжения и диссипативная функция. После этого, задавая теплофизические свойства материала и условия нагрева, определяем темпе-

ратуру для следующего момента времени. Этот процесс повторяем для заданного количества шагов по времени.

В качестве примера расчёта рассмотрим задачу о термомеханическом поведении резинового виброизолятора типа ВР-201 (рис. 1). Элементы с такой формой свободной поверхности предназначены для работы в качестве основных упругих связей резонансных вибрационных машин, виброизоляторов машин с тяжёлой рамой и т.д. Их применение позволяет повысить долговечность и надёжность машин, уменьшить динамические нагрузки при переходе через резонанс и остановке машины, снизить уровень звукового давления. Использование элементов типа ВР позволяет решить вопрос создания устойчивых упругих опор с высокой несущей способностью и малой сдвиговой жёсткостью за счёт выбора их формы.

В настоящее время для расчётов элементов типа ВР-201 существует только полуэмпирические формулы по определению их жесткостных параметров.

Ниже исследуются термомеханические эффекты в виброизоляторах типа ВР-201 с использованием изложенного выше алгоритма расчёта. Численные расчёты проведены для виброизолятора ВР-201 из резины 51-1562 при следующих значениях параметров: высота $H = 80$ мм; внешний диаметр $D = 100$ мм; внутренний диаметре 70 мм; температура окружающей среды $T_0 = 20$ °С; коэффициент Пуассона $\nu = 0,495$; плотность $\rho = 1005$ кг/м³; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,155$ Вт/м; коэффициент температуропроводности $a = 0,081 \cdot 10^{-6}$ м²/с; амплитуда колебаний $A = 1$ мм; частота колебаний – 10 Гц.

Половина меридионального сечения этого элемента приведена на рис. 2. Условия нагружения задаются граничными условиями следующим образом: на

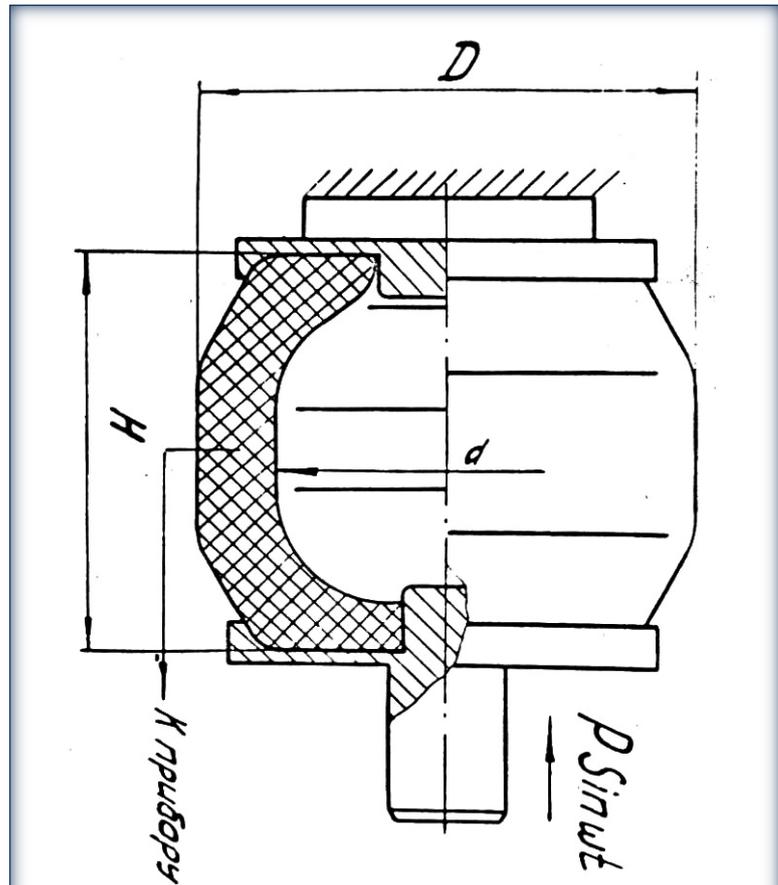


Рис. 1 – Виброизолятор типа ВР-201

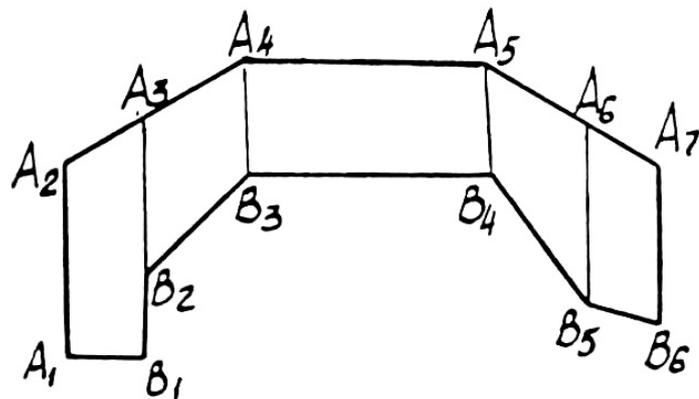


Рис. 2 – Расчётная схема виброизолятора ВР-201

одном из торцов виброизолятора задано перемещение $w = w_0 \cos \omega t$, другой жёстко закреплён, $w = 0$; боковая поверхность свободна от нагрузки. Исследуемый элемент находится в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой, температура которой равна T_0 .

На рис. 3 показано распределение поля температур в массиве исследуемого виброизолятора для разных фиксированных моментов времени. Кривая 1 соответствует моменту времени $t = 500$ с, кривая 2 – моменту $t = 1000$ с, кривая 3 – моментам 1500 и 2000 с. Таким образом, спустя 1500 с после начала циклического нагружения образца температура в резиновом массиве устанавливается.



Рис. 3 – Распределение поля температур в виброизоляторе BP-201

Экспериментальная проверка полученных результатов осуществлялась по методике, изложенной в [7].

Сравнение расчётных данных с экспериментальными показывает их хорошее совпадение в центральных точках и некоторое расхождение в граничных областях ($\approx 0,5^\circ\text{C}$). Этот факт объясняется несоответствием реальных условий теплообмена на торцах элемента принятым при расчёте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуменюк, Б.П. О тепловой неустойчивости в связанных динамических задачах термовязкоупругости / Б.П. Гуменюк, В.Г. Карнаухов // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1978. - №7. - С. 609-613.
2. Кост, Г.Л. Конечноэлементный расчет связанных термовязкоупругих эффектов в конструкциях при длительном воздействии периодической вибрации / Г.Л. Кост, Дж.М. Херд. - 1978. - 16, №8. - С. 35-40.
3. Решение осесимметричной задачи термопластичности для тонкостенных и толстостенных тел вращения на ЕС ЭВМ / Ю.Н. Шевченко, В.В. Пискун, М.Е. Бабенко и др. - Киев: Наук. думка, 1980. - 196 с.
4. Карнаухов, В.Г. Связанные задачи термовязкоупругости / В.Г. Карнаухов. - Киев: Наук. думка, 1982. - 260 с.
5. Кучер, Н.К. Термомеханическое поведение вязкоупругой призмы при циклическом нагружении / Н.К. Кучер, В.Г. Карнаухов // Пробл. прочности. - 1981. - №8. - С. 58-62
6. Сенченков, И.К. К задаче об осесимметрических вынужденных колебаниях вязкоупругого цилиндра конечной длины при кинематическом возбуждении / И.К. Сенченков, Б.П. Гуменюк // Прикл. механика. - 1981. - 17, №9. - С. 111-115.
7. Прикладная механика упруго-наследственных сред. В 3-х томах / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, В.Г. Карнаухов, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. - К.: Наук. думка, 2013. - Т. 2. Методы расчета эластомерных деталей. - 2012. - 616 с.

REFERENCES

1. Gumenyuk, B.P. and Karnaukhov, V.G. (1978), "On thermal instability in related dynamic problems of thermoviscoelasticity", *Dokl. AN USSR. Ser. A.*, no. 7, pp. 609-613.
2. Cost, G.L. and Herd, J.M. (1978), "Finite element calculation of thermoviscoelastic related effects in constructions at long influence of periodic vibration", vol. 16, no. 8, pp. 35-40.

3. Shevchenko, Yu.N., Piskun, V.V. and Babenko, M.Ye. (1980), *Resheniye osesimmetrichnoy zadachi termoplastichnosti dlya tonkostennykh i tolstostennykh tel vrashcheniya na YES EVM* [Solution of the axisymmetric problem of thermal plasticity for thin and large rotation bodies by ES computers], Naukova dumka, Kiev, USSR.
4. Karnaukhov, V.G. (1982), *Svyazannyye zadachi termov'yazkouprugosti* [Related tasks of thermoviscoelasticity], Naukova dumka, Kiev, USSR.
5. Kucher, N.K. and Karnaukhov, V.G. (1981), "Thermomechanical behavior of viscoelastic prism under cyclic loading", *Journal Strength of Materials*, no. 8, pp. 58-62.
6. Senchenkov, I.K. and Gumenyuk, B.P. (1981), "On the problem of forced axisymmetric oscillations of viscoelastic cylinder of finite length with kinematic excitation", *Applied Mechanics*, vol. 17, no. 9, pp. 111-115.
7. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagil'skiy, Ye.L., Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugo-nasledstvennykh sred. Tom 2. Metody raschota elastomernykh detaley*. [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Methods for calculating elastomeric parts], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.

Об авторах

Кобец Анатолий Степанович, доктор экономических наук, профессор, ректор, Днепропетровский государственный аграрный университет (ДГАУ), Днепропетровск, Украина

Волошин Алексей Иванович, член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск, Украина

Твердохлеб Татьяна Емельяновна, инженер, научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск, Украина

Сокол Сергей Петрович, инженер, старший преподаватель, декан факультета, Днепропетровский государственный аграрный университет (ДГАУ), Днепропетровск, Украина, sp.sokol@mail.ru

Цаниди Иван Николаевич, инженер, ассистент, Днепропетровский государственный аграрный университет (ДГАУ), Днепропетровск, Украина

About the authors

Kobets Anatoly Stepanovich, Doctor of Economical Sciences (D. Sc.), Professor, Prex, Dnepropetrovsk State Agrarian University, Dnepropetrovsk, Ukraine

Voloshin Alexey Ivanovich, Corresponding Member of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Vice Director for Science, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmnanu@yandex.ru

Tverdokhleba Tatyana Yemelyanovna, Engineer, Researcher of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine

Sokol Sergey Petrovich, Engineer, Senior Teacher, Dean of the Faculty, Dnepropetrovsk State Agrarian University (DSAU), Dnepropetrovsk, Ukraine

Tsanidy Ivan Nikolaevich, Engineer, Doctoral Student, Dnepropetrovsk State Agrarian University (DSAU), Dnepropetrovsk, Ukraine