

УДК 622.002.5-752.2

Логинова А.А., аспирант
(Государственное ВУЗ «НГУ» МОН Украины),
Дырда В.И., д-р техн. наук, профессор
Шевченко В.Г., д-р техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩИХ ОПОР ГОРНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Логінова А. О., аспірант
(Державний ВНЗ «НГУ» МОН України),
Дирда В. І., д-р техн. наук, професор
Шевченко В. Г., д-р техн. наук, ст. наук. співроб.
(ІГТМ НАН України)

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОІЗОЛЮЮЧИХ ОПОР ГІРНИЧИХ МАШИН В УМОВАХ ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Loginova A.A., Doctoral Student
(State HEI «NMU» MES of Ukraine),
Dyrda V.I., D. Sc. (Tech.), Professor
Shevchenko V.G., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

RESEARCHES OF PARAMETERS OF MINING MACHINE VIBOISOLATION SUPPORTS UNDER CYCLIC LOADING

Аннотация. Выполнены исследования и проведен расчёт параметров напряжённо-деформированного состояния резиновых виброизолирующих опор горных машин для повышения их надёжности и долговечности. В результате экспериментальных исследований получена зависимость осадки виброизолирующей опоры типа ВР201 от величины осевого нагружения. Приведены результаты расчета напряжённо-деформированного состояния виброопоры, исходя из классического и моментного подхода метода конечных элементов. Представлены поля распределения перемещений и напряжений в фрагменте виброопоры при её нагружении. Полученные результаты могут применяться для выбора допустимых режимов нагружения при эксплуатации исследуемых опор как элемента вибрационных горных машин. Приведены данные по теплообразованию в резиновых элементах типа ВР201 при длительных циклических нагрузках, исходя из которых могут быть рекомендованы режимы нагружения, обеспечивающие необходимую надёжность и долговечность данных элементов горных машин.

Ключевые слова: виброизолирующая опора, горные машины, циклические нагружения, напряжённо-деформированное состояние, надёжность и долговечность.

Введение.

На сегодняшний день для решения вопросов виброизоляции горных машин, испытывающих в процессе эксплуатации значительные динамические нагрузки, активно применяются виброизолирующие опоры типа ВР, которые также могут выполнять функции упругих звеньев.

Получен значительный опыт применения таких виброизолирующих систем в условиях горного и горно-металлургического производства. Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение таких виброизолирующих опор даёт возможность повысить долговечность и надёжность горных машин в целом, а также обеспечить выполнение норм безопасности жизнедеятельности на площадках обслуживания оборудования, а именно – снизить вредное вибрационное воздействие на организм людей, обслуживающих машины, а также защитить опорные конструкции.

Цель статьи – исследование и расчёт параметров напряжённо-деформированного состояния резиновых виброизолирующих опор горных машин для повышения их надёжности и долговечности.

Экспериментальные исследования виброизолирующих опор типа ВР. Методика экспериментальных исследований виброизолирующих опор ВР201 заимствована из [1].

На рис. 1 показан объёмный вид виброизолирующей опоры типа ВР201. На рис. 2 приведена её схема. На рис. 3 показана силовая характеристика при осевом сжатии виброизолирующей опоры, из которой видно, что при рабочих амплитудах нагружения до 10 мм силовая характеристика является практически линейной.



Рисунок 1 – Виброизолирующая опора

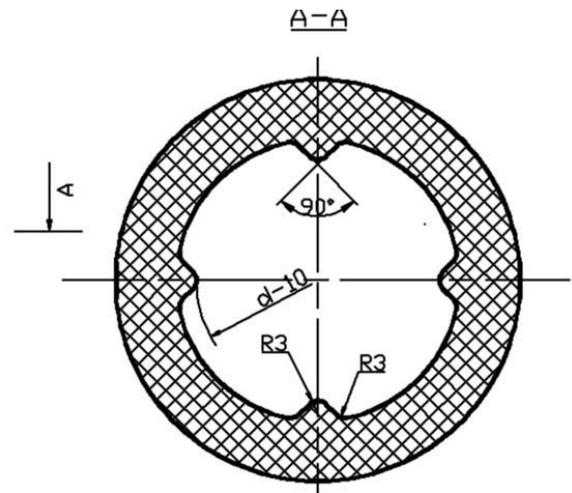
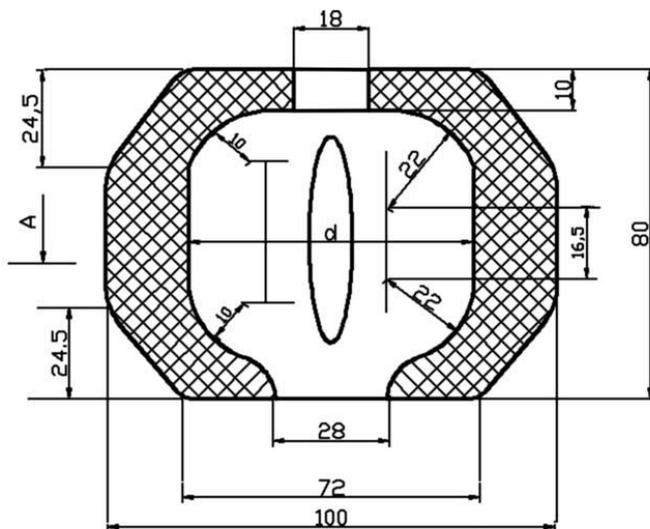


Рисунок 2 – Схема виброизолирующей опоры ВР201

Расчет напряженно-деформированного состояния виброизолирующей опоры.

Рассматриваемая виброизолирующая опора, по сути, является эластомерной конструкцией. Расчёт напряжённо-деформированного состояния таких конст-

рукций требует создания специальных подходов. Такая потребность обусловлена неточностью результатов, получаемых при использовании классического подхода к расчёту напряжённо-деформированного состояния эластомеров. Неточность результатов, в данном случае объясняется следующими причинами. Эластомер, как слабосжимаемый материал имеет коэффициент Пуассона, близкий к значению 0,5. При расчёте напряжённо-деформированного состояния, в соответствии с классическим подходом, вводятся компоненты тензора упругих постоянных. С их помощью устанавливается связь между компонентами тензоров деформаций и напряжений. Эти компоненты выражают через, так называемые, коэффициенты Ляме. При приближении коэффициента Пуассона к 0,5, значение одного из них (λ) стремится к бесконечности.

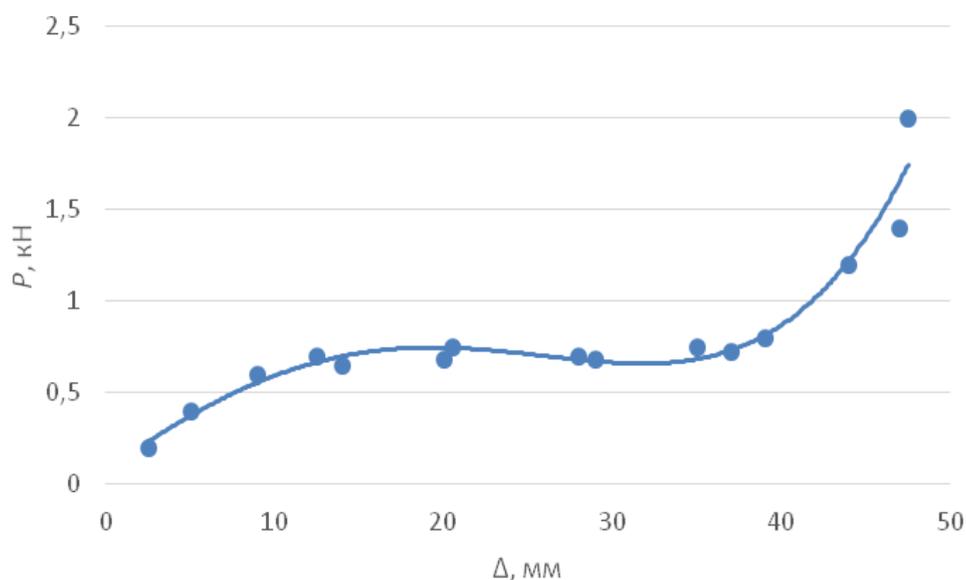


Рисунок 3 – Зависимость осадки Δ виброизолирующей опоры ВР201 от осевой силы P

При создании специальных подходов к расчёту напряжённо-деформированного состояния виброизолирующих опор необходимо учесть специфические свойства слабосжимаемых материалов и условия контактного взаимодействия эластомерных элементов с другими деталями конструкций. Моментная схема конечного элемента основана на тройной аппроксимации: полей деформаций, перемещений и функции изменения объёма [4, 5]. При этом последовательность разложения деформаций и функции изменения объёма выбирается таким образом, чтобы исключить все компоненты деформаций, реагирующие на эффект «ложного сдвига» и жёсткие смещения, а также те компоненты функции изменения объёма, которые реагируют на слабую сжимаемость эластомера. Также точность вычислений по вышеуказанной схеме определяет выбор полинома, аппроксимирующего функцию перемещений.

В работе [6] в качестве такого полинома был принят интерполяционный полином Эрмита, который задаётся через узловые значения перемещений конечного элемента и их частные производные:

$$u_{k'} = \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 \sum_{r=0}^3 u_i^{(pqr)} \phi^{(pqr)} = \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 \sum_{r=0}^3 \left(u_{k'}^{(pqr)} N_{(pqr)} + \frac{\partial u_{k'}^{(pqr)}}{\partial x_3} N'_{(pqr)} \right), \quad (1)$$

где $N_{(pqr)}$, $N'_{(pqr)}$ – функции формы; $u_i^{(pqr)}$ – узловые значения перемещений конечного элемента; $\phi^{(pqr)}$ – аппроксимирующая функция.

Далее приведен вывод соотношений матрицы жёсткости трёхмерного конечного элемента, который основывается на вариации упругой энергии деформации:

$$\delta W = \iiint_V \sigma^{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV. \quad (2)$$

Учитывая закон Гука, получаем

$$\delta W = \iiint_V (2\mu g^{ik} g^{jl} \varepsilon_{kl} \delta \varepsilon_{ij} + \lambda \theta \delta \theta) dV. \quad (3)$$

Аппроксимация перемещений, основанная на интерполяционном полиноме, выбранном ранее, имеет вид:

$$\begin{aligned} u_{k'} = \sum_{pqr}^{113} \omega_{k'}^{(pqr)} \psi^{(pqr)} = & \omega_{k'}^{(000)} + \omega_{k'}^{(001)} \psi^{(001)} + \omega_{k'}^{(002)} \psi^{(002)} + \omega_{k'}^{(003)} \psi^{(003)} + \\ & + \omega_{k'}^{(010)} \psi^{(010)} + \omega_{k'}^{(011)} \psi^{(011)} + \omega_{k'}^{(012)} \psi^{(012)} + \omega_{k'}^{(013)} \psi^{(013)} + \omega_{k'}^{(100)} \psi^{(100)} + \\ & + \omega_{k'}^{(101)} \psi^{(101)} + \omega_{k'}^{(102)} \psi^{(102)} + \omega_{k'}^{(103)} \psi^{(103)} + \omega_{k'}^{(110)} \psi^{(110)} + \omega_{k'}^{(111)} \psi^{(111)} + \\ & + \omega_{k'}^{(112)} \psi^{(112)} + \omega_{k'}^{(113)} \psi^{(113)}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\psi^{(pqr)}$ – набор степенных координатных функций вида; $\omega_{k'}^{(pqr)}$ – коэффициенты разложения;

$$\psi^{(pqr)} = \frac{(x^1)^p (x^2)^q (x^3)^r}{p!q!r!};$$

$p = 0, 1$, $q = 0, 1$, $r = 0, 1, 2, 3$ – степени аппроксимирующего полинома по соответствующим направлениям.

Компоненты тензора деформаций аппроксимируем путём разложения ком-

понент ε_{ij} в ряд Маклорена в окрестности начала координат:

$$\varepsilon_{ij} = \sum_{stg}^{(ij)} e_{ij}^{(stg)} \psi^{(stg)}, \quad (5)$$

где

$$\sum_{stg}^{(ij)} = \sum_{s=0}^{L_{ij}} \sum_{t=0}^{M_{ij}} \sum_{g=0}^{N_{ij}}; \quad (6)$$

$$L_{ij} = \begin{cases} l & i, j \neq 1, \\ l-1; & \end{cases} \quad (7)$$

$$M_{ij} = \begin{cases} m & i, j \neq 2, \\ m-1; & \end{cases} \quad (8)$$

$$N_{ij} = \begin{cases} n & i, j \neq 3, \\ n-1. & \end{cases} \quad (9)$$

В матричной форме данные соотношения имеют вид:

$$\{\varepsilon_{ij}\} = \{e_{ij}\}^T \{\psi_{ij}\}. \quad (10)$$

Коэффициенты разложения $e_{ij}^{(stg)}$ вычисляются по формулам:

$$e_{11}^{(pqr)} = \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \omega_{k'}^{(\mu+1\nu\eta)} b_{(p+1-\mu q-\nu r-\eta)}^{k'}; \quad (11)$$

$$e_{22}^{(pqr)} = \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \omega_{k'}^{(\mu\nu+1\eta)} b_{(p-\mu q+1-\nu r-\eta)}^{k'}; \quad (12)$$

$$e_{33}^{(pqr)} = \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \omega_{k'}^{(\mu\nu\eta+1)} b_{(p-\mu q-\nu r+1-\eta)}^{k'}; \quad (13)$$

$$e_{12}^{(pqr)} = \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \left(\omega_{k'}^{(\mu\nu+1\eta)} b_{(p-\mu+1q-vr-\eta)}^{k'} + \omega_{k'}^{(\mu+1\nu\eta)} b_{(p-\mu q-v+1r-\eta)}^{k'} \right); \quad (14)$$

$$e_{13}^{(pqr)} = \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \left(\omega_{k'}^{(\mu\nu\eta+1)} b_{(p-\mu+1q-vr-\eta)}^{k'} + \omega_{k'}^{(\mu+1\nu\eta)} b_{(p-\mu q-vr-\eta+1)}^{k'} \right); \quad (15)$$

$$e_{23}^{(pqr)} = \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \left(\omega_{k'}^{(\mu\nu\eta+1)} b_{(p-\mu q-v+1r-\eta)}^{k'} + \omega_{k'}^{(\mu\nu+1\eta)} b_{(p-\mu q-vr-\eta+1)}^{k'} \right), \quad (16)$$

где

$$b_{(\mu\nu\lambda)}^{k'} = \frac{\partial^{(\mu+\nu+\lambda)} z^{k'}}{(\partial x_1)^\mu (\partial x_2)^\nu (\partial x_3)^\lambda} \Big|_{x_1=x_2=x_3=0}. \quad (17)$$

Анализируя каждую из компонент разложения $e_{ij}^{(stg)}$, замечаем, что некоторые коэффициенты $\omega_{k'}^{(pqr)}$ не входят в разложение для аппроксимации перемещений (4), поэтому исключаем их и записываем компоненты деформаций в следующем виде

$$\varepsilon_{11} = e_{11}^{(000)} + e_{11}^{(001)} \psi^{(001)} + e_{11}^{(002)} \psi^{(002)} + e_{11}^{(003)} \psi^{(003)} + e_{11}^{(010)} \psi^{(010)} + e_{11}^{(011)} \psi^{(011)} + e_{11}^{(012)} \psi^{(012)} + e_{11}^{(013)} \psi^{(013)}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_{22} = e_{22}^{(000)} + e_{22}^{(001)} \psi^{(001)} + e_{22}^{(002)} \psi^{(002)} + e_{22}^{(003)} \psi^{(003)} + e_{22}^{(100)} \psi^{(100)} + e_{22}^{(101)} \psi^{(101)} + e_{22}^{(102)} \psi^{(102)} + e_{22}^{(103)} \psi^{(103)}; \quad (19)$$

$$\varepsilon_{33} = e_{33}^{(000)} + e_{33}^{(001)} \psi^{(001)} + e_{33}^{(002)} \psi^{(002)} + e_{33}^{(010)} \psi^{(010)} + e_{33}^{(011)} \psi^{(011)} + e_{33}^{(012)} \psi^{(012)} + e_{33}^{(100)} \psi^{(100)} + e_{33}^{(101)} \psi^{(101)} + e_{33}^{(102)} \psi^{(102)} + e_{33}^{(110)} \psi^{(110)} + e_{33}^{(111)} \psi^{(111)} + e_{33}^{(112)} \psi^{(112)}; \quad (20)$$

$$\varepsilon_{12} = e_{33}^{(000)} + e_{33}^{(001)} \psi^{(001)} + e_{33}^{(002)} \psi^{(002)} + e_{33}^{(003)} \psi^{(003)}; \quad (21)$$

$$\varepsilon_{23} = e_{33}^{(000)} + e_{33}^{(001)} \psi^{(001)} + e_{33}^{(002)} \psi^{(002)} + e_{33}^{(100)} \psi^{(100)} + e_{33}^{(101)} \psi^{(101)} + e_{33}^{(102)} \psi^{(102)}; \quad (22)$$

$$\varepsilon_{13} = e_{33}^{(000)} + e_{33}^{(001)} \psi^{(001)} + e_{33}^{(002)} \psi^{(002)} + e_{33}^{(010)} \psi^{(010)} + e_{33}^{(011)} \psi^{(011)} + e_{33}^{(012)} \psi^{(012)}. \quad (23)$$

В матричной форме коэффициенты e_{ij} записываются следующим образом:

$$\{e_{ij}\} = [F_{ij}^{s'}] \{\omega_{k'}\}. \quad (24)$$

Коэффициенты матрицы $[F_{ij}^{s'}]$ вычисляются на основе выше перечисленных формул.

Введение функции изменения объёма позволяет учитывать слабую сжимаемость эластомера. Аппроксимацию функции изменения объёма также записываем, отбросив компоненты, не удовлетворяющие принципам моментной схемы:

$$\theta = \sum_{a=0}^0 \sum_{b=0}^0 \sum_{c=0}^2 \xi^{(\alpha\beta\gamma)} \psi^{(\alpha\beta\gamma)} = \xi^{(000)} + \xi^{(001)} \psi^{(001)} + \xi^{(002)} \psi^{(002)}, \quad (25)$$

где $\xi^{(\alpha\beta\gamma)}$ – коэффициенты разложения, которые находим из соотношения:

$$\xi^{(\alpha\beta\gamma)} = \frac{\partial^{(\alpha+\beta+\gamma)} \varepsilon_{ij} g^{ij}}{(\partial x_1)^\alpha (\partial x_2)^\beta (\partial x_3)^\gamma} \Big|_{x_1=x_2=x_3=0}. \quad (26)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \xi^{(000)} &= e_{11}^{(000)} g^{11} + e_{22}^{(000)} g^{22} + e_{33}^{(000)} g^{33}; \\ \xi^{(001)} &= e_{11}^{(001)} g^{11} + e_{22}^{(001)} g^{22} + e_{33}^{(001)} g^{33}; \\ \xi^{(002)} &= e_{11}^{(002)} g^{11} + e_{22}^{(002)} g^{22} + e_{33}^{(002)} g^{33}. \end{aligned} \quad (27)$$

В матричной форме выражения (25) и (26) имеют вид:

$$\{\theta\} = \{\xi\}^T \{\psi_\theta\}, \quad (28)$$

$$\{\xi\} = [F_\theta^{s'}] \{\omega_{k'}\}. \quad (29)$$

Подставляя соотношения (24) и (28) в (3), получим

$$\delta W = \iiint_V \delta \{e_{ij}\}^T \{\psi_{ij}\} 2\mu g^{ik} g^{jl} \{e_{kl}\}^T \{\psi_{kl}\} dV + \iiint_V \lambda \{\xi\}^T \{\psi_\theta\} \delta \{\xi\} \{\psi_\theta\}^T dV \quad (30)$$

Вводя замену

$$[H^{ijkl}] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 2\mu g^{ik} g^{jl} \{\psi_{ij}\} \{\psi_{kl}\}^T \sqrt{g} dx_1 dx_2 dx_3, \quad (31)$$

$$[H^\theta] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \lambda \{\psi_\theta\} \{\psi_\theta\}^T \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3, \quad (32)$$

получаем новое выражение для вариации упругой энергии деформации

$$\delta W = \delta \{\omega_{s'}\}^T [F_{ij}^{s'}]^T [H^{ijkl}] [F_{kl}^{t'}] \{\omega_{t'}\} + \delta \{\omega_{s'}\}^T [F_\theta^{s'}]^T [H^\theta] [F_\theta^{t'}] \{\omega_{t'}\}. \quad (33)$$

Перейдём от коэффициентов разложения $\{\omega_{k'}\}$ в (33) к коэффициентам разложения для перемещений через интерполяционный полином Эрмита. Для этого сопоставим (1) и (4), записанные в матричном виде:

$$\begin{aligned} u_{k'} &= \{\omega_{k'}\}^T \{\psi\}, \\ u_{k'} &= \{u_i\}^T \{N\}, \end{aligned} \quad (34)$$

где $\{u_i\}$ – вектор узловых значений перемещений и производных.

Замечаем, что в этом случае связь между коэффициентами разложения $\{\omega_{k'}\}$ и $\{u_i\}$ имеет вид

$$\{\omega_{k'}\} = [A] \{u_i\} \quad (35)$$

либо

$$\{N\} = [A]^T \{\psi\}, \quad (36)$$

где $[A]$ – матрица преобразования, а $\{N\}$ – функции формы.

С учётом (33) запишем новое выражение для вариации энергии деформации:

$$\begin{aligned} \delta W = & \delta \{u_{s'}\}^T [A]^T [F_{ij}^{s'}] [K^{ijkl}] [F_{kl}^{t'}] [A] \{u_{t'}\} + \\ & + \delta \{u_{s'}\}^T [A]^T [F_{\theta}^{s'}] [K^{\theta}] [F_{\theta}^{t'}] [A] \{u_{t'}\} \end{aligned} \quad (37)$$

либо

$$\delta W = \delta \{u_{s'}\}^T [K^{s't'}] \{u_{t'}\}, \quad (38)$$

где $[K^{s't'}]$ – матрица жёсткости конечного элемента:

$$[K^{s't'}] = [A]^T [F_{ij}^{s'}] [H^{ijkl}] [F_{kl}^{t'}] [A] + [A]^T [F_{\theta}^{s'}] [H^{\theta}] [F_{\theta}^{t'}] [A]. \quad (39)$$

Для субпараметрического конечного элемента порядок полинома, используемого для описания геометрии, ниже порядка полинома, аппроксимирующего искомую функцию (перемещения). Отображение между координатами локальной x_i и глобальной z_i системы координат имеет вид

$$\begin{aligned} z_1(x_1, x_2, x_3) &= \sum_{i=0}^M N_i(x_1, x_2, x_3) \cdot z_i^1; \\ z_2(x_1, x_2, x_3) &= \sum_{i=0}^M N_i(x_1, x_2, x_3) \cdot z_i^2; \\ z_3(x_1, x_2, x_3) &= \sum_{i=0}^M N_i(x_1, x_2, x_3) \cdot z_i^3, \end{aligned} \quad (40)$$

где M – количество узловых точек конечного элемента.

Таким образом, были получены коэффициенты матриц, необходимые для построения матрицы жёсткости конечного элемента: $[A]$, $[F_{ij}^{s'}]$ и $[F_{\theta}]$. Глобальная матрица рассчитываемой виброизолирующей опоры строится путём суммирования соответствующих коэффициентов матриц жёсткости конечных элементов.

Рассматриваемая виброизолирующая опора ВР201 (рис. 1, 2) обладает малой поперечной жесткостью, имеет марку резины – 2959, коэффициент Пуассона $\nu=0,4999$, модуль сдвига $G_0=1,76 \times 10^6$ Па. В процессе эксплуатации подвергается осевому сжатию. Результаты расчёта величины осадки виброопоры при различных значениях величины нагрузки приведены на рис. 3.

В табл. 1 даны результаты расчета напряженно-деформированного состояния виброопоры ВР201 исходя из классического и моментного подхода метода конечных элементов.

Таблица 1 – Результаты расчета НДС виброопоры ВР201

Нагрузка, кН	Перемещение, м		Напряжение, МПа	
	Классическая схема	Моментная схема	Классический подход	Моментный подход
0,6	0,44794	0,32359	0,013887	0,013673
0,4	0,33596	0,21572	0,0092578	0,0091153
0,1	0,055993	0,053931	0,0023145	0,0022788
0,05	0,027996	0,026965	0,0011572	0,0011423

В данном случае, учитывая, что эластомерная конструкция виброопоры ВР201 является симметричной, будем рассматривать её фрагмент – четвертую часть. Анализируемый фрагмент был разбит на конечные элементы в форме параллелепипеда (рис. 4).

На рис. 5 представлены поля распределения перемещений, а на рис. 6 – поля распределения напряжений в фрагменте виброопоры при её нагружении.

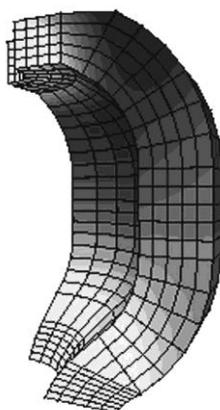


Рисунок 4 – Разбиение виброопоры на конечные элементы

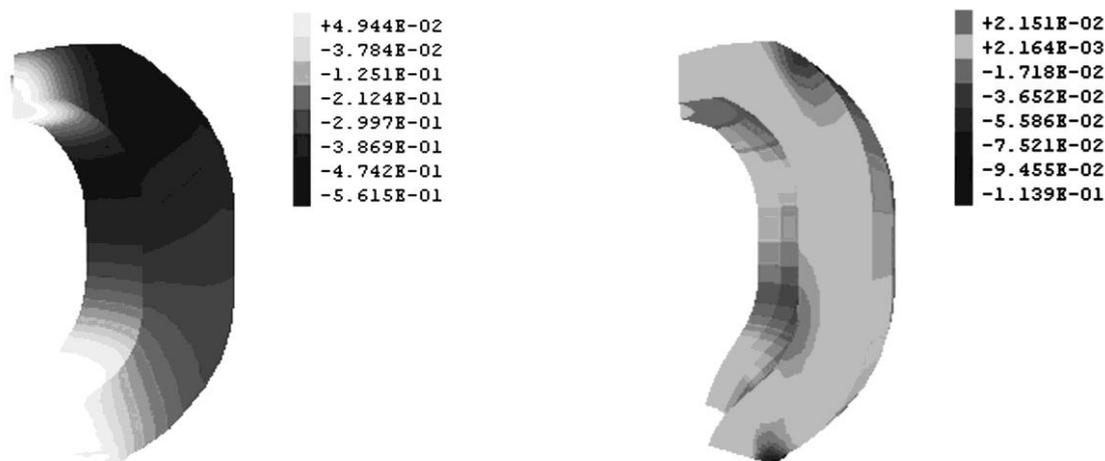


Рисунок 5 – Распределение перемещений при нагружении виброизолятора

Рисунок 6 – Распределение напряжений при нагружении виброизолятора

Определение жесткости и температуры диссипативного разогрева при длительных циклических нагрузках.

Метод конечных элементов также используют и для решения осесимметричной задачи термовязкоупругости для виброопоры, как тела вращения, в

условиях конвективного теплообмена с окружающей средой.

Предполагается, что к некоторой части поверхности тела вращения Σ_σ приложена осесимметричная циклическая нагрузка $\vec{t}_n(t_m, t_{zn})$, а на остальной поверхности заданы циклические перемещения $\vec{u}(u, w)$.

В случае пренебрежения быстро затухающими переходными процессами рассматриваемая задача гармонического деформирования сводится к решению системы дифференциальных уравнений [7]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} + \omega^2 \rho u = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr}}{r} + \omega^2 \rho u = 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\lambda}{a} \frac{\partial T}{\partial t} - D \end{cases} \quad (41)$$

при начальных и граничных условиях

$$\begin{aligned} T &= T_0(r, z) \quad (t = t_0); \\ t_m &= \sigma_{rr} l_r + \sigma_{zr} l_z, \\ t_{zn} &= \sigma_{zr} l_r + \sigma_{zz} l_z \quad \text{на поверхности } \Sigma_\sigma; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} &= -\alpha(T - T_0) \quad \text{на поверхности } \Sigma, \end{aligned}$$

где $\sigma_{zz}, \sigma_{\varphi\varphi}, \sigma_{rr}, \sigma_{zr}$ – комплексные компоненты тензора напряжений; u, w – радиальная и осевая комплексные амплитуды вектора перемещений; ω – круговая частота; T – осредненная за цикл температура; ρ – плотность материала; D – осредненная за цикл диссипативная функция; λ, a, α – коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и теплоотдачи; T_0 – температура окружающей среды; l_r, l_z – направляющие косинусы внешней нормали \vec{n} к поверхности тела Σ_σ .

Систему уравнений (41) можно заменить эквивалентными им вариационными условиями. Для решения полученной задачи область меридионального сечения виброизолятора делится на отдельные элементы. В дальнейшем, для определения комплексных амплитуд компонент вектора перемещений и температуры в узловых точках, обычно получают две системы линейных алгебраических уравнений.

Такой алгоритм расчета используется для определения, как полей напряжений, так и температур диссипативного разогрева виброопор. При этом также определяются параметры жесткости β , расчетные значения которых при малых

деформациях сжатия (до 10 %) являются постоянными:

$$\beta = \frac{2 \int_{r_0}^{R_0} r \sigma_z(r, H) dr}{|E^*| (R_0^2 - r_0^2) (W_0 / H)},$$

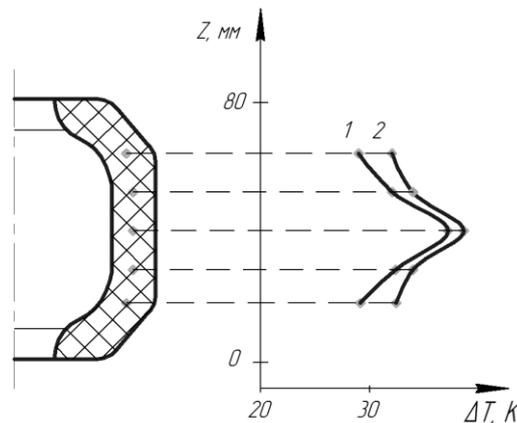
где R_0 и r_0 – наружный и внутренний радиусы сечения, принятого за отсчетное, $R_0 = D/2, r_0 = d/2$; W_0 – заданное смещение торца виброизолятора; H – высота виброизолятора; r, z – радиальная и осевая координаты; σ_z – нормальное напряжение.

Значения жесткости C для элементов типа ВР определяются по формуле [2]

$$C = \beta \frac{|E^*| F}{H},$$

где $|E^*|$ – абсолютное значение комплексного модуля Юнга; F – площадь среднего сечения, $F = \pi (R_0^2 - r_0^2)$. Для рассматриваемой резины $\beta=0,47$; $C=80,15$ кН/м.

На рис. 7 показаны результаты экспериментальных исследований распределения температур в объеме виброопоры ВР201.



1 – амплитуда $A=3$ мм, частота $\omega=20,3$ Гц; 2 – $A=5$ мм, $\omega=13,3$ Гц;

Рисунок 7 – Распределение приращения температуры ΔT в элементах ВР201

Проведённые в настоящей работе исследования позволяют сделать следующие **выводы**:

- для виброопор ВР201 получены значения величины перемещений и напряжений в зависимости от нагружения, рассчитанных на основе классической и моментной схем метода конечных элементов. Полученные результаты могут применяться для выбора допустимых режимов нагружения при эксплуатации исследуемых вибрационных опор;

- элементы типа ВР201 обладают характеристиками полезными при работе в специфических условиях работы, которые наблюдаются в вибрационных горных машинах, а также в машинах, которые в силу специфики кинематической схемы и технологии режима в той или иной мере испытывают постоянные циклические нагрузки. Такими характеристиками являются малая сдвиговая жёсткость при необходимой несущей способности, а также уменьшенный диссипативный разогрев;

- исходя из приведенных в работе данных по теплообразованию в резиновых элементах типа ВР201, могут быть рекомендованы режимы нагружения, обеспечивающие необходимую надежность и долговечность данных элементов горных машин. При этом следует учитывать, что длительная долговечность резиновых элементов на основе каучука НК и СКИ-3 возможна в том случае, если максимальное превышение температуры ΔT над температурой окружающей среды будет не выше 60-70К, в случае длительного нагружения при более высокой температуре будет наблюдаться эффект термомеханической неустойчивости и долговечность при этом будет ограничена 50-100 часами нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикладная механика упруго-наследственных сред. Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – К.: Наукова думка, 2011. – 568 с.
2. Прикладная механика упруго-наследственных сред. Т. 2. Методы расчета эластомерных деталей / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – К.: Наукова думка, 2012. – 616 с.
3. Определение напряженно-деформированного состояния эластомерных виброизоляторов / С.Н. Гребенюк, Н.И. Лисица, Е.С. Решевская [и др.] // Геотехническая механика. - 2007. – Вып. 63. – С. 125–132.
4. Киричевский, В.В. Метод конечных элементов в механике эластомеров / В.В. Киричевский. – К.: Наук. думка, 2002. – 655 с.
5. Расчёт напряженно-деформированного состояния виброизоляторов сложной формы / В.И. Дырда, С.Н. Гребенюк, Н.И. Лисица Н.И. [и др.] // Геотехническая механика. - 2012. – Вып. 106. – С. 105–110.
6. Специальные конечные элементы в программном комплексе «МИРЕЛА+» / С.Н. Гребенюк, Е.Л. Мизерная, Е.С. Решевская, В.Н. Тархова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2010. – Вып. 3(39). – С.132-136.
7. Расчёт напряженно-деформированного состояния эластомерных конструкций сложной формы / В.И. Дырда, А.С. Кобец, С.Н. Гребенюк [и др.] // Геотехническая механика. –2007. – Вып. 70. – С. 122–131.
8. Логинова, А.А. Расчёт систем виброизоляции горных машин с учётом эффекта старения / А.А. Логинова, В.И. Дырда, В.Г. Шевченко // Геотехническая механика. – 2015. – Вып. 125. – С. 253-264.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, E.L. and Kobets, A.S. (2011) *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 1. Mehanika deformirovaniia i razrusheniia elastomerov* [Applied mechanics of the resiliently-inherited environments. T. 1. Mechanics of deformation and destruction of elastomers], Naukova dumka, Kiev, UA.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskiy, E.L. and Kobets, A.S. (2012) *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei* [Applied mechanics of the resiliently-inherited environments. T. 2. [Methods of calculation of elastomer details], Naukova dumka, Kiev, UA.
3. Grebenyuk, S.N., Lisitsa, N.N., Reshevskaya, E.S., Tarhova, V.N. and Kirichevskiy, R.V. (2007), «Determination of the tensely-deformed state of elastomer vibratory insulators», *Geo-Technical Mechanics*, no. 63, pp. 125–132.
4. Kirichevskiy, V.V. (2002), *Metod konechnykh elementov v mekhanike elastomerov* [Method of even-

tual elements in mechanics of elastomers], Naukova dumka, Kiev, UA.

5. Dyrda, V.I., Grebenyuk, S.N., Lisitsa, N.I., Reshevskaya, E.S., Tarhova, V.N., Novikova, A.V. and Zabolotnaya, E.U. (2012), « Calculation of the tensely-deformed state of vibratory insulators difficult form», *Geo-Technical Mechanics*, no. 106, pp. 105–110.

6. Grebenyuk, S.N., Mizernaya, E.L., Reshevskaya, E.S. and Tarhova, V.N. (2010), « Special eventual elements in the programmatic complex «МИРЕЛІА+»», *Vestnik Hersonskogo natsionalnogo tehniceskogo universiteta*, Vol. 3(39), pp.132-136.

7. Dyrda, V.I., Kobets, A.S., Grebenyuk, S.N., Reshevskaya, E.S., Tarhova, V.N., Kirichevskiy, R.V., Lisitsa, N.N., Tyimko, N.V. and Goncharenko, A.V. (2007), « Calculation of the tensely-deformed state of elastomer constructions of difficult form», *Geo-Technical Mechanics*, no. 70, pp. 122–131.

8. Loginova, A.A., Dyrda, V.I. and Shevchenko, V.G. (2015), « Calculation of the systems of vibratory insulation of mine machines taking into account the effect of senescence», *Geo-Technical Mechanics*, no. 125, pp. 253-264.

Об авторах

Логінова Анастасія Александрівна, аспірант, ГБУЗ «Национальный горный университет» МОН України (ГБУЗ «НГУ» МОН України), Днепропетровск, Украина, anastasiia.loginova.nmu@gmail.com.

Дырда Виталий Илларионович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, vita.igtm@gmail.com.

Шевченко Владимир Георгиевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, V.Shevchenko@nas.gov.ua.

About the authors

Loginova Anastasiya Aleksandrovna., Doctoral Student, State Higher Educational Institution MES of Ukraine (SHEI «NMU» MES of Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, anastasiia.loginova.nmu@gmail.com.

Dyrda Vitaliy Illarionovich., Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head 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, vita.igtm@gmail.com.

Shevchenko Vladimir Georgiyevich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Senior Researcher, Scientific Secretary of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, V.Shevchenko@nas.gov.ua.

Анотація. Виконано дослідження і проведено розрахунків параметрів напружено-деформованого стану гумових віброізолюючих опор гірничих машин для підвищення їхньої надійності та довговічності. У результаті експериментальних досліджень отримано залежність осадки віброізолюючої опори типу ВР201 від величини осьового навантаження. Наведено результати розрахунку напружено-деформованого стану віброопори, виходячи із класичного і моментного підходу методу кінцевих елементів. Представлено поля розподілу переміщень і напруг у фрагменті віброопори при її навантаженні. Отримані результати можуть застосовуватися для вибору припустимих режимів навантаження при експлуатації досліджуваних опор, як елемента вібраційних гірничих машин. Наведено дані по теплоутворенню в гумових елементах типу ВР201 при тривалих циклічних навантаженнях, виходячи з яких можуть бути рекомендовані режими навантаження, що забезпечують необхідну надійність та довговічність даних елементів гірничих машин.

Ключові слова: віброізолююча опора, гірничі машини, циклічні навантаження, напружено-деформований стан, надійність та довговічність.

Abstract. The researches carried out and calculated parameters of the stress-strain state of rubber vibroisolation supports for mining machines to increase their reliability and durability. As a result of experimental researches the dependence of the vibroisolating of support type VR201 upset from the magnitude of the axial-on loading. The results of calculation of stress-strain state of vibra-

tion support, based on the classical approach and the torque finite element method. Presents the distribution of the field of displacements and stresses in the fragment vibroisolation support during its loading. The results can be used to select the permissible loading conditions when operating the test supports as part of vibration mining machines. The data on the heat generation in rubber elements type VR201 during long-enforcement cyclic loads on the basis of which the loading modes can be recommended to ensure the required reliability and durability of mining machines elements.

Keywords: vibroisolation support, mining machines, cyclic loading, stress-strain state, durability and reliability.

Статья поступила в редакцию 15.01. 2016

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Шевченко Г.А.