

УДК 622.002.5-192:678

DOI: <https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.157>

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЯЖЁЛЫХ ГОРНЫХ МАШИН

¹Дырда В.И., ¹Твердохлеб Т.Е., ²Черний А.А., ²Калганков Е.В., ¹Новикова А.В.,
²Колбасин В.А.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ²Днепровский аграрно-экономический университет

ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ЕЛАСТОМЕРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВАЖКИХ ГІРНИЧИХ МАШИН

¹Дирда В.І., ¹Твердохліб Т.О., ²Черній О.А., ²Калганков Є.В., ¹Новікова А.В.,
²Колбасін В.О.

¹Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, ²Дніпровський державний аграрно-економічний університет

FORECASTING RELIABILITY INDICATORS OF ELASTOMERIC ELEMENTS OF HEAVY MINING MACHINES

¹Dyrda V.I., ¹Tverdohklib T.O., ²Cherniy A.A., ²Kalhanikov Ye.V., ¹Novikova A.V.,
²Kolbasin V.O.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine, ²Dnipro State Agrarian and Economic University

Аннотация. Тяжёлые горные машины вибрационного типа (вибропитатели, виброгрохоты и т.д.) эксплуатируются в очень высоконагруженных режимах и агрессивных средах. На их эксплуатационную надёжность влияют факторы как физического, так и химического полей. Это большие динамические нагрузки, наличие вибрации, воздействие на машину растворов кислот и щелочей и т.д. Широкое применение в качестве упругих звеньев в конструкциях вибрационных машин нашли элементы типа ВР (виброизоляторы резиновые), БРМ (блоки резинометаллические), ШРМ (шарниры резинометаллические). В этих деталях в качестве упругого материала используется амортизационная резина; при этом надёжность вибрационной машины в большей мере зависит от надёжности её упругих звеньев.

В статье приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на определение показателей эксплуатационной надёжности резинометаллических виброамортизаторов и опор тяжёлых горных машин.

Исследования показывают, что основной причиной отказов виброизоляторов машин являются изменения физико-механических свойств материала, которые при длительном циклическом нагружении и воздействии агрессивной среды проявляются в изменении основных свойств и параметров элементов. К таким дефектам относят появление больших остаточных деформаций, износ, истирание резины, появление на свободной поверхности резины видимых усталостных трещин и развитие магистральных трещин, отслаивание резинового массива от металлической арматуры, потеря несущей способности, потеря устойчивости, изменение жесткостных и диссипативных параметров и т.д.

Основным и наиболее точным источником данных при определении показателей надёжности являются эксплуатационные наблюдения и испытания на надёжность вибрационных машин. Для прогнозирования их безотказной работы необходимо установить закон распределения появления отказов. Для эластомерных элементов основной математической моделью прогнозирования их ресурса и работоспособности принято распределение Вейбулла.

Оценка показателей надёжности резинометаллических элементов типа БРМ102 (блоки резинометаллические), ВРМ (виброизоляторы резинометаллические), установленных на вибропитателях для выпуска и доставки руды, проводилась по результатам незавершённых эксплуатационных испытаний на надёжность по плану /N, R, T/. За критерий отказа элемента принималось появление магистральных (усталостных) трещин в резиновом массиве. Прогнозирование показателей надёжности виброизоляторов машин по изменению их жёсткости рассмотрено на примере изменения жёсткости резинометаллических элементов типа БРМ 102.

Ключевые слова: вибрационная горная машина, упругий элемент, показатель надёжности, испытание на надёжность

Введение

Эластомеры (резина, полиуретаны) занимают важное место среди материалов, предназначенных для изготовления упругих звеньев и виброизоляторов тяжёлых горных машин, в том числе и машин вибрационного типа: вибропитателей для выпуска и доставки руды, виброгрохотов, виброконвейеров и т.д. В большинстве случаев, эти машины работают в экстремальных условиях, т.е. при длительных циклических нагрузках и агрессивной внешней среде. Поэтому надёжность упругих подвесок таких машин имеет весьма важное значение для инженерной практики.

Оценка надёжности элементов таких машин осуществляется обычно на основании испытаний (лабораторных или стендовых) на надёжность, в том числе и ускоренных; что даёт прогнозирование надёжности с помощью временных рядов или зависимостей, связывающих выходные параметры элементов с их ресурсом.

Целью настоящей работы является определение основных показателей надёжности с использованием существующих методов применительно к резиновым и резинометаллическим элементам, нашедшим широкое применение в различных системах виброзащиты тяжёлых машин и в качестве упругих звеньев.

Критерии отказов виброизоляторов машин

Критерии отказов виброизоляторов, как и других изделий машиностроения, могут быть сформулированы на основании анализа причин, характера и последствий всех наблюдаемых отказов. При этом признаками возникновения отказа считаются недопустимые изменения работоспособности выходных параметров (выход значений параметров за пределы допустимых, нарушение признаков нормальной работы и т.д.).

Каждый отдельный элемент обладает, как правило, рядом характерных эксплуатационных свойств и параметров, обусловленных его функциональным назначением и ролью в рассматриваемой конкретной машине, спецификой её эксплуатации.

Результаты многолетних исследований [1] свидетельствуют, что основными выходными параметрами резинометаллических элементов таких машин следует считать прочность, жёсткость, температуру диссипативного разогрева, несущую способность.

Причины отказов виброизоляторов можно объединить в четыре основные группы: конструктивные, технологические, эксплуатационные дефекты, старение (износ). Все отказы элементов связаны с происходящими в них процессами разрушения.

Многолетние исследования работоспособности и закономерностей разрушения резинометаллических элементов [1, 2] показывают, что основной причиной их отказов являются изменения физико-механических свойств материала, которые при длительном циклическом нагружении проявляются в изменении основных свойств и параметров элементов (появление больших остаточных деформаций, износ, истирание резины, появление на свободной поверхности резины видимых усталостных трещин и развитие магистральных трещин, отслаивание

резинового массива от металлической арматуры, потеря несущей способности и т.д.).

Такие отказы часто называют износосовыми. Следует отметить, что усталостные трещины появляются преимущественно на поверхности элементов, при этом в большинстве случаев вдоль границы резина-металл, затем рост продолжается по направлению к центру и дальше вглубь. Элементы с такими трещинами ещё длительное время сохраняют свою работоспособность, что является весьма ценным при промышленной эксплуатации, так как исключается внезапный отказ всей машины и появляется возможность замены дефектных элементов в плановом порядке.

Анализ причин отказов эксплуатирующихся виброизоляторов с учётом [1, 2] позволяет сформулировать критерии их отказов:

- разрушение виброизоляторов;
- появление магистральных трещин;
- потеря устойчивости;
- изменение жесткостных и диссипативных параметров.

Последний критерий отказа связан со старением материала, воздействием масел, химически активных сред, солнечного или радиоактивного облучения. Он может оказаться основным для вибрационных машин с упругим приводом, так как влечёт за собой значительное изменение амплитуды колебаний.

Выбор модели отказов виброизоляторов машин

Наиболее достоверные оценки показателей надёжности получают при использовании результатов эксплуатационных наблюдений и испытаний на надёжность, их статистической обработке. Основные затруднения при этом состоят в ограниченности информации об отказах, объективных трудностях, связанных со сложностью наблюдений в реальных условиях, а также в незавершённости таких испытаний. Поэтому важно иметь возможность определять показатели надёжности до завершения эксплуатационных испытаний.

Основная задача при расчёте показателей надёжности состоит в правильном, обоснованном выборе модели отказов, которая с высокой степенью достоверности отражала бы объективную картину процесса потери изделием работоспособности. Сформулированные выше на основе многочисленных комплексных исследований работоспособности и закономерностей разрушения натуральных резинометаллических элементов различных типов критерии их отказов [1, 2] являются основой для выбора соответствующей модели отказов.

На практике установлено, что для резиновых элементов в процессе эксплуатации, как правило, характерны отказы нескольких видов. Это отказы как внезапные, вызываемые случайными причинами или неблагоприятным их сочетанием (скрытые дефекты, механические повреждения резины, нарушения технологии изготовления или норм эксплуатации, возникновение пиковых концентраций нагрузок и т.д.), так и постепенных отказов, связанных с усталостным разрушением резины, её износом и старением. Кроме указанных причин, к статистической неоднородности данных по отказам приводят: эксплуатация изделий

в различных условиях и режимах; изготовление одного и того же изделия различными предприятиями; улучшение качества изделий по мере выпуска и т.д.

В практических приложениях очень важно понять и изучить причины возникновения неоднородности, чтобы исключить их или правильно учитывать при выборе модели отказов и расчёте показателей надёжности. Игнорирование же неоднородности приводит обычно к серьёзным ошибкам в оценке показателей надёжности.

В случае выявления неоднородных данных специальными методами (приработочные испытания) и их статистически обоснованного исключения из выборки для эластомерных элементов основной математической моделью распределения ресурса работоспособности установлено распределение Вейбулла, плотность распределения вероятности которого задаётся выражением

$$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a} \right)^{b-1} \cdot e^{-(t/a)^b}, \quad (1)$$

где b – параметр формы распределения;

a – параметр масштаба;

t – время наработок.

Основные показатели надёжности в этом случае определяют параметрическим методом по вычисленным оценкам параметров a и b распределения (1).

Оценка показателей надёжности виброизоляторов машин по эксплуатационным данным их наработок на отказ

Оценка параметров распределения Вейбулла. Приняв распределение наработок на отказ в виде (1), необходимо получить оценки параметров a и b этого закона, входящих в расчётные формулы определяемых показателей надёжности.

Основными показателями надёжности резиновых деталей в соответствии с [7], где приведена классификация и номенклатура основных показателей надёжности, будут: средний срок службы (ресурс) T_{cp} (среднее арифметическое значение наработок на отказ); гамма-процентный ресурс $t_{\gamma\%}$ (минимальное значение ресурса каждого изделия, в течение которого обеспечивается его работоспособное состояние с некоторой вероятностью $\gamma\%$) и вероятность безотказной работы $P(t)$ на наработку $t = T$. При известных оценках a и b распределения Вейбулла (1) эти показатели надёжности определяют по формулам:

- средний срок службы

$$T_{cp} = a \Gamma \left(1 + \frac{1}{b} \right); \quad (2)$$

где a и b – параметры распределения;

Γ – гамма-функция;

- гамма-процентный срок службы

$$t_{\gamma\%} = a \left(-\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{\frac{1}{b}}; \quad (3)$$

- вероятность безотказной работы на наработку $t = T$

$$P(t = T) = \exp \left[- \left(\frac{T}{a} \right)^b \right], \quad (4)$$

где T – наработка на отказ.

Исходными данными для оценки показателей надёжности являются полученные по результатам эксплуатационных испытаний резиновых деталей так называемые смешанные или цензурированные выборки вида

$$t_1, t_2, \tau_1, t_3, \dots, t_r, \dots, \tau_r, \dots, t_n, \quad (5)$$

где t_i – значение наработок до отказа;

τ_j – значения наработок до цензурирования.

Основными причинами цензурирования, имеющими место при эксплуатации резиновых деталей, являются: снятие из эксплуатации (наблюдений) остальных элементов узла из-за отказа одного из них; необходимость оценки показателей надёжности до наступления отказов всех испытываемых элементов; разновременность начала и (или) окончания эксплуатации.

На первом этапе оценки показателей надёжности резинометаллических элементов рассматриваются однократно цензурированные выборки, в которых значения всех наработок до цензурирования равны между собой и не меньше наибольшей наработки на отказ. Оценки показателей надёжности по таким выборкам регламентированы в [6] в зависимости от плана наблюдений. В случае испытаний на надёжность виброизоляторов таким планом является $/N, R, T/$ – план испытаний, согласно которому одновременно начинают испытания N элементов, отказавшие во время испытания элементы заменяют новыми (буква R в обозначении плана), испытания прекращают при истечении времени испытаний или наработки T для каждого из N элементов.

Практическое значение имеют не только оценки показателей надёжности, но и определение возможных наиболее вероятных пределов их изменения. Соотношения для расчёта доверительных границ показателей надёжности получают по функции правдоподобия в соответствии с [7]

$$t_{\gamma, \text{в,н}} = t_\gamma \pm z_\beta \sqrt{D(t_\gamma)};$$

$$P(t)_{\text{в,н}} = P(t) \pm z_\beta \sqrt{D[P(t)]}; \quad (6)$$

где $t_{\gamma, \text{в,н}}$ – верхняя и нижняя границы гамма-процентного ресурса;

$P(t)_{\text{в,н}}$ – верхняя и нижняя границы вероятности безотказной работы;

$D(t_\gamma)$, $D[P(t)]$ – соответственно дисперсии гамма-процентного ресурса, вероятности безотказной работы.

При уровне значимости $\gamma = 90\%$ по таблицам [7] определяют z_β – квантиль нормального распределения

$$z_\beta = 1,645 \left(\beta = \frac{1 + \gamma}{2} \right).$$

Прогнозирование надёжности виброизоляторов машин по изменению их жесткостных параметров

В соответствии со сформулированными выше критериями отказов, в качестве основного параметра, ответственного за работоспособность резиновых деталей, может быть использован коэффициент их жёсткости. Наблюдаемые изменения во времени жесткостных параметров резиновых деталей, составляющие для средне- и сильнонаполненных резин до 50-60 %, требуют своевременного прогнозирования механических свойств элементов, особенно при их использовании в резонансных машинах.

Критерием отказа при этом считается выход жесткостных параметров за пределы допустимых

$$c(t) \leq c_{\max},$$

где $c(t)$ – значение жёсткости в момент времени t ;

c_{\max} – критическое значение жёсткости.

На основе анализа экспериментальных данных об изменении жёсткости во времени принимаем её временную зависимость в виде [4]

$$c(t) = m + ht, \quad (7)$$

где m – начальный разброс значений жёсткости, случайная величина с нормальным законом распределения;

h – скорость изменения жёсткости, случайная величина с нормальным распределением.

Показатели надёжности элементов в случае (7) определяют следующим образом:

- вероятность безотказной работы на заданную наработку [7]

$$P(t=T) = P(c \leq c_{\max}) = \frac{1}{\sigma_c \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{c_{\max}} \exp\left[-\frac{(c - c_{\max})^2}{2\sigma_c^2}\right] dc =$$

$$= 0,5 + \Phi\left[\frac{c_{\max} - \bar{m} - \bar{h}T}{\sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_h^2 \cdot T^2}}\right], \quad (8)$$

где \bar{m} , σ_m , \bar{h} , σ_h – средние и среднеквадратические значения случайных величин m и h соответственно;

Φ – табулированная функция интеграла вероятности;

- гамма-процентный ресурс [7]

$$t_\gamma = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + Bc_0}}{B}, \quad (9)$$

$$A = \frac{c_{\max} - \bar{m}}{\bar{h}};$$

$$B = \frac{\chi_\gamma^2 \sigma_h^2}{\bar{h}^2} - 1;$$

$$c_0 = \chi_\gamma \sigma_m^2 - A^2,$$

где χ_γ – квантили нормального распределения, соответствующие вероятности γ , при $\gamma = 90\%$, $\chi_\gamma = 1,645$.

Примеры расчёта показателей надёжности резиновых деталей

Оценка показателей надёжности резинометаллических элементов проводилась по результатам незавершённых эксплуатационных испытаний на надёжность элементов типа БРМ102 (блоки резинометаллические), установленных на вибропитателях для выпуска и доставки руды. Появление магистральных (усталостных) трещин в резиновом массиве принималось за критерий отказа элемента. Под наблюдением находилось 120 элементов, эксплуатируемых при частоте нагружения 11 Гц и амплитуде 0,008 м; 16 из них вышло из строя. Оставшиеся элементы находились под контролем до наработки 21000 ч (цензурирование). Зафиксированный отказ при наработке 18410 ч одного элемента повлёк за собой снятие из наблюдений ещё трёх элементов, эксплуатирующихся с ним в одном узле (количество элементов в одном узле равно 3). Из наблюдения исключены отказы элементов, наступившие до начала усталостного разрушения эластомера.

Вариационный ряд выработок на отказ и наработок до цензурирования в этом случае

3340; 6670; 9175; 9749; 10323; 10897; 13771; 14125; 15250; 16075; 17070; 18410; 18410* (3); 19080; 19750; 20420; 21000* (10),

где * обозначены наработки до цензурирования, а в скобках указано их количество.

Для полученного вариационного ряда наработок на отказ оценка показателей надёжности проводилась по приведённой в [7] последовательности.

Для полученного вариационного ряда [7] оценки параметров выбранного закона распределения составляют: параметр масштаба $a = 53455$, параметр формы $b = 2,0728$. Функция распределения плотности вероятности

$$f(t) = \frac{2,0728}{53455^{2,0728}} t^{1,728} e^{\left[-\left(\frac{t}{53455}\right)^{2,0128}\right]}. \quad (12)$$

По полученным оценкам параметров a и b распределения проводилась проверка соответствия распределения Вейбулла экспериментальным данным (10) согласно методике, представленной в [2]. Проверка показала, что опытные данные не противоречат гипотезе о распределении Вейбулла наработок на отказ на уровне значимости $\alpha = 0,01$ ($\gamma = 90\%$).

С учётом полученных оценок параметров распределения Вейбулла показатели надёжности БРМ имели следующие значения: средний ресурс наработки $T_{cp} = 47350$ ч; гамма-процентный ресурс $t_\gamma = 90\% = 18051$ ч, его доверительный интервал $/T_n = 13635; T_g = 22467/$; вероятность безотказной работы на наработку $T = 21000$ $P(t = 21000) = 0,860$ и её доверительный интервал $/T_n = 0,805; T_g = 0,927/$. Полученные результаты хорошо согласуются с аналитическими расчётами долговечности БРМ102 [2]. Приведённое значение параметра формы b соответствует значению этого параметра для данного вида отказа [2]. В дальнейшем при накоплении информации об отказах, оценка параметров распределения

Вейбулла и показателей надёжности будут уточняться, проводится классификация по видам отказов в зависимости от расчётных значений параметра.

Пример расчёта показателей надёжности ВРМ (виброизоляторы резино-металлические). Оценку показателей надёжности виброизоляторов выполним по результатам незавершённых эксплуатационных испытаний элементов типа ВРМ с размером резинового массива – диаметр 200 мм, высота 100 мм. Эти элементы использованы в виброизолирующих системах однобарабанных окомкователей, эксплуатирующихся в условиях Северного горно-обогатительного комбината.

За критерий отказа виброизолятора принималось появление магистральных (усталостных) трещин в резиновом массиве элемента.

Под наблюдением находилось 56 элементов, установленных на двух машинах, и эксплуатируемых при частоте нагружения 16 Гц; 20 виброизоляторов вышли из строя. Оставшиеся элементы продолжают работать, и наработка каждого составила 54000 ч.

Вариационный ряд наработок на отказ и наработок до цензурирования получен следующий:

20000 (4), 20000* (4), 40000 (12), 54000* (36),

где * обозначены наработки до цензурирования, а в скобках указано количество элементов.

Для полученного вариационного ряда оценки параметров распределения Вейбулла составляют: параметр формы равен 2,4082; параметр масштаба – 81060. Гипотеза соответствия распределения Вейбулла полученному ряду наработок на отказ ВРМ не противоречива на уровне значимости.

Вычисленные показатели надёжности имели следующие значения: девяносто-процентный ресурс $t_9 = 90\% = 31840$ (более 4-х лет) и его доверительный интервал $/T_n = 22419$; $T_6 = 41261/$; вероятность безотказной работы на наработку $T = 29280$ (4 года) $P(t = 29280) = 0,918$. Полученные результаты хорошо согласуются с аналитическими расчётами долговечности ВРМ и исходным требованиям на разработку их параметрического ряда. Приведённое значение параметра формы b соответствует значению этого параметра для данного вида отказа [7]. Однако полученные результаты, вследствие ограниченности выборки об отказах ВР, следует рассматривать как прикидочные, и по мере накопления такой информации оценки параметров распределения Вейбулла и показателей надёжности необходимо уточнять в рамках данного подхода.

Расчёт показателей надёжности виброизоляторов машин по неоднородным данным. Оценку показателей надёжности эластомерных элементов с учётом различных видов отказов выполним по экспериментальным наработкам на отказ элементов типа ВРМ102 (200×100×50 мм), установленных в количестве 120 шт. на конвейерах КВ2Т. Нарботки на отказ этих элементов в сгруппированном виде приведены в табл. 1: в таблице представлены интервалы времени (тыс. ч), соответствующие числу отказов m_i и рассчитанные эмпирические плотности распределения

$$f_i = \frac{m_i}{h \cdot N}, \quad (13)$$

где $h = \Delta t$ – ширина интервала группирования данных, $\Delta t = 4$ тыс.ч;
 N – общее количество отказов.

По данным табл. 1 построена гистограмма эмпирического распределения, представленная на рис. 1.

Таблица 1 – Нарботка на отказ элементов БРМ102

Интервалы времени $t_i \cdot 10^3, \text{ч}$	Частоты отказов m_i	Эмпирические плотности распределения $f_i \cdot 10^{-5}$
0–4	5	5,280
4–8	1	1,040
8–12	3	3,125
12–16	4	4,166
16–18	11	9,375
18–20	2	2,080
20–24	1	1,040

Анализ полученной гистограммы показывает, что эмпирическое распределение двухвершинное, и для его описания необходимо использовать математическую модель смеси распределений. Из опыта проведения расчётов показателей надёжности эластомерных элементов и физики их отказов можно сделать вывод, что для описания таких распределений могут быть использованы смеси двух видов: смесь распределений экспоненциального (внезапные отказы) и распределения Вейбулла (постепенные отказы, связанные с усталостным разрушением резинового массива элементов). Определению подлежат весовые коэффициенты составляющих распределений и их параметры. Полученные величины позволяют определять основной показатель надёжности элементов – вероятность безотказной работы на заданную наработку.

Ввиду сложности рассматриваемой задачи её решение рассмотрим в два этапа.

На первом этапе для рассматриваемой модели отказов получают оценки параметров, составляющих смесь распределений, используя сочетание метода моментов и графоаналитического метода [7]. Полученные значения параметров позволяют в первом приближении оценить показатели надёжности элементов и являются достоверными начальными приближениями в итерационных процедурах определения

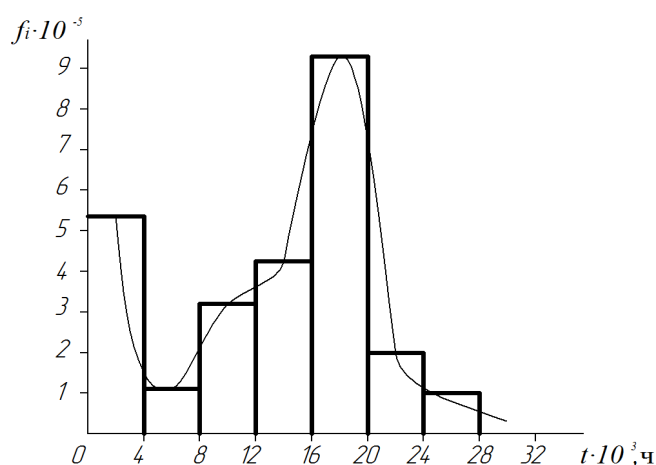


Рисунок 1 – Гистограмма эмпирической плотности распределения наработки на отказ элементов типа БРМ102

параметров, составляющих смесь распределений на следующем этапе.

На втором этапе предлагается плотность распределения наработок на отказ элементов описывать в виде смеси простых законов распределения, в общем случае различных типов и количество компонент смеси $k = 2$. В этом случае решение задачи сводится к итерационным процедурам определения параметров составляющих смесь распределений. При этом ищутся наиболее вероятная комбинация составляющих смесь распределений и их число.

Оценка вероятности безотказной работы $P(t)$ на наработку 20000 ч составила $P(t = 20000) = 0,782$. Полученная оценка $P(t)$ по смеси распределений отличается от полученной ранее оценки ($P(t) = 0,866$) с учётом только распределения Вейбулла (внезапные отказы пренебрегались). Налицо потеря информации и ошибка в оценке показателя надёжности. Поэтому необходимо в расчётах показателей надёжности эластомерных элементов данного вида использовать смеси распределений, позволяющие избежать таких ошибок.

Прогнозирование надёжности виброизоляторов машин по изменению их жесткостных параметров. Прогнозирование показателей надёжности виброизоляторов машин по изменению их жёсткости рассмотрим на примере изменения жёсткости резинометаллических элементов типа БРМ102 из резины 51-1562, установленных в различных узлах виброконвейера КВ2Т. В табл. 2 приведены значения жесткостей C_1, C_2, C_3 соответственно трём элементам.

Таблица 2 – Изменение жёсткости элементов

$t \cdot 10^3, \text{ ч}$	$C_1, \text{ кН/м}$	$C_2, \text{ кН/м}$	$C_3, \text{ кН/м}$
0,0	197	250	249
1,5	221	277	256
3,0	235	286	270
4,5	238	297	273
6,0	239	300	274
9,0	239	300	275
12,0	239	300	275
15,0	239	300	275
18,0	239	300	275
21,0	239	300	275
24,0	239	300	275

Предельным значением жёсткости элементов в соответствии с критерием разрушения взято её увеличение на 20-25 %: $C_{\max} = 312,5 \text{ кН/м}$. Для числовых данных табл. 2 получаем следующие значения параметров: $m = 254,98$ – начальный разброс значений жёсткости, случайная величина с нормальным законом распределения; $\sigma_m = 13,44$ – дисперсия разброса значений жёсткости; $h = 0,00096$ – скорость изменения жёсткости, случайная величина с нормальным распределением; $\sigma_h = 0,212 \cdot 10^{-3}$ – дисперсия значений скорости изменения жёсткости.

Показатели надёжности определяем по формулам (8), (9), и в этом случае они имеют следующие значения: гамма-процентный ресурс $t_\gamma = 90\% = 43023 \text{ ч}$; вероятность безотказной работы на наработку $T = 20000$ $P(t = 20000) = 0,996$.

Полученные результаты по оценке надёжности БРМ свидетельствуют о высоком уровне ресурса, в течение которого с большой степенью вероятности сохраняется их работоспособность. По мере накопления информации об отказах и изменения во времени жесткостных параметров необходимо проводить корректировку оценок показателей надёжности в рамках указанного методического подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. Киев: Наук. думка, 1988. 232 с.
2. Прикладная механика упругонаследственных сред: в 4 т. / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. Киев: Наук. думка, 2012. Т. 2: Методы расчета эластомерных деталей. 616 с.
3. Расчет стационарных колебаний и диссипативного разогрева нелинейных вязкоупругих тел при периодическом нагружении / И.К. Сенченков, В.И. Дырда, В.И. Козлов, О.П. Терещенко, А.Б. Мазнецова. *Прикладная механика*. 1986. № 6. С. 49-55.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00890607>
4. Определение физико-механических свойств наполненных резин / В.И. Дырда, Е.В. Калганков, Г.Н. Агальцов и др. *Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2014. № 116. С. 158-173.
5. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. Київ: Держстандарт України, 1995. 33 с.
6. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ: Держстандарт України, 1995. 33 с.
7. Определение показателей надёжности эластомерных элементов машин / Дырда В.И., Твердохлеб Т.Е., Монастырский В.Ф. и др. *Труды II Международного симпозиума по механике эластомеров*. Днепропетровск, 23-25 июня 1997 г. Днепропетровск: Полиграфист, 1998. С. 235-295.

REFERENCES

1. Dyrda, V.I. (1988), *Prochnost i razrusheni y eelastomernykh konstruktсий v ekstremalnykh usloviyakh* [Strength and destruction of elastomeric structures in extreme conditions], Naukova dumka, Kyiv, USSR.
2. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zviagilskii, E.L. and Kobets, A.S. (2012), *Prikladnaya mekhanika uprugo-nasledstvennykh sred. Tom 2. Metody rascheta elastomernykh detalei* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 2. Design techniques of elastomeric parts], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
3. Senchenkov, I.K., Dyrda, V.I., Kozlov, V.I., Tereshchenko, O.P. and Maznetcova, A.V. (1986), "Calculation of stationary oscillations and dissipative heating of nonlinear viscoelastic bodies under periodic loading", *Applied mechanics*, no. 6, pp. 49-55.
<https://doi.org/10.1007/BF00890607>
4. Dyrda, V.I., Agaltsov, G.N., Novikova, A.V., Kalgankov, E.V., Tsanidi, I.N. and Dorohov, M.A. (2014), "Determination of physical and mechanical properties of the filled rubber", *Geo-Technical Mechanics*, no. 116, Dnipro, Ukraine.
5. State Standard of Ukraine (1995), *DSTU 2861-94. Nadiynist tekhniky. Analiz nadiynosti. Osnovni polozhennyay* [DSTU 2861-94. Reliability of equipment. Reliability analysis. Substantive provisions], Derzhstandart Ukrayiny, Kyiv, Ukraine.
6. State Standard of Ukraine (1995), *DSTU 2862-94. Nadiynist tekhniky. Metody rozrakhunku pokaznykiv nadiynosti. Zahalni vymohy* [DSTU 2862-94. Reliability of equipment. Methods of calculating reliability indicators. General requirements.], Derzhstandart Ukrayiny, Kyiv, Ukraine.
7. Dyrda, V.I., Tverdokhle, T.Ye., Monastyrskiy, V.F. et al. (1998), "Determination of reliability indicators of elastomeric elements of machines", *Trudy II Mezhdunarodnogo simpoziuma po mekhanike elastomerov* [Proceedings of the II International Symposium on Elastomer Mechanics], Dnepropetrovsk, USSR, 23-25 June 1997, pp. 235-295.

Об авторах

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 НАНУ), г. Днепр, Украина, vita.igtm@gmail.com

Твердохлеб Татьяна Емельяновна, инженер, научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, vita.igtm@gmail.com

Черний Александр Анатольевич, магистр, старший преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), г. Днепр, Украина, sanek20.1984@gmail.com

Калганков Евгений Васильевич, магистр, старший преподаватель кафедры «Надежность и ремонт машин», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), г. Днепр, Украина, kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua

Новикова Алина Вячеславовна, магистр, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, alina.goncharenko@gmail.com

Колбасин Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Надежность и ремонт машин», Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет (ДГАЭУ), г. Днепр, Украина, dsau_nrm@ukr.net

About the authors

Dyrda Vitalii Illarionovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Tverdokhlib Tetiana Omelianivna, Master of Science, Researcher of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine, vita.igtm@gmail.com

Chernii Oleksandr Anatoliiovych, Master of Science, Senior Lecturer of Department "Reliability and repair of machines", Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, sanek20.1984@gmail.com

Kalhankov Yevhen Vasylovych, Master of Science, Senior Lecturer of Department "Reliability and repair of machines", Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, kalhankov.ye.v@dsau.dp.ua

Novikova Alina Viacheslavivna, Master of Science, Junior Researcher of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine, alina.goncharenko@gmail.com

Kolbasin Volodymyr Oleksandrovysh, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of Department "Reliability and repair of machinery", Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine, dsau_nrm@ukr.net

Анотація. Важкі гірничі машини вібраційного типу (віброживильники, віброгрохоти та ін.) експлуатуються в дуже високонавантажених режимах і агресивних середовищах. На їх експлуатаційну надійність впливають фактори як фізичного, так і хімічного полів. Це великі динамічні навантаження, наявність вібрації, вплив на машину розчинів кислот і лугів та ін. Широке застосування в якості пружних ланок в конструкціях вібраційних машин знайшли елементи типу ВР (віброізолятори гумові), БРМ (блоки гумометалеві), ШРМ (шарніри гумометалеві). У цих деталях в якості пружного матеріалу використовується амортизаційна гума; при цьому надійність вібраційної машини в більшій мірі залежить від надійності її пружних ланок.

У статті наводяться результати теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на визначення показників експлуатаційної надійності гумометалевих віброамортизаторів і опор важких гірничих машин.

Дослідження показують, що основною причиною, відмов віброізоляторів машин є зміни фізико-механічних властивостей матеріалу, які при тривалому циклічному навантаженні і впливі агресивного середовища, виявляються в зміні основних властивостей і параметрів елементів. До таких дефектів відносять появу великих залишкових деформацій, знос, стирання гуми, поява на вільній поверхні гуми видимих втомних тріщин і розвиток магістральних тріщин, відшаровування гумового масиву від металеві арматури, втрата несучої здатності, втрата стійкості, зміна характеристик жорсткості та дисипативних параметрів та ін.

Основним і найбільш точним джерелом даних при визначенні показників надійності є експлуатаційні спостереження і випробування на надійність вібраційних машин. Для прогнозування їх безвідмовної роботи, необхідно встановити закон розподілу появи відмов. Для еластомерних елементів основною математичною моделлю прогнозування їх ресурсу і працездатності прийнято розподіл Вейбулла.

Оцінка показників надійності гумових елементів типу БРМ102 (блоки гумометалеві), ВРМ (віброізолятори гумометалеві), встановлених на віброживильниках для випуску і доставки руди, проводилася за результатами незавершених експлуатаційних випробувань на надійність за планом /N, R, T/. За критерій відмови елемента приймалося поява магістральних (втомних) тріщин в гумовому масиві. Прогнозування показників надійності віброізоляторів машин по зміні їх жорсткості розглянуто на прикладі зміни жорсткості гумометалевих елементів тину БРМ102.

Ключові слова: вібраційна гірнича машина, пружний елемент, показник надійності, випробування на надійність

Abstract. Heavy vibrating mining machines (vibratory feeders, vibrating screens, etc.) are operated in very high-load modes and in aggressive environments. Their operational reliability is influenced by factors of both physical and chemical fields. These are large dynamic loads, the presence of vibration, the impact on the machine of solutions of acids and alkalis, etc. Widely used as elastic links in the designs of vibrating machines are elements such as BP (rubber vibration isolators), BRM (rubber-metal blocks), SRM (rubber-metal hinges). In these parts, cushioning rubber is used as the elastic material. Therefore, the reliability of the entire vibrating machine, to a greater extent depends on the reliability of its elastic links.

The article presents the results of theoretical and experimental studies aimed at determining the operational reliability indicators of rubber-metal vibration dampers and supports of heavy mining machines.

Studies show that the main reason for failure of vibration insulators of machines is a change in the physical and mechanical properties of the material, which, under prolonged cyclic loading and exposure to an aggressive environment, manifest themselves in a change in the basic properties and parameters of the elements. Such defects include the appearance of large residual deformations, wear, abrasion of rubber, the appearance of visible fatigue cracks on the free surface of rubber and the development of main cracks, peeling of the rubber mass from metal reinforcement, loss of bearing capacity, and loss of stability, change in stiffness and dissipative parameters, etc.

The main and most accurate source of data when determining reliability indicators is operational observations and reliability tests of vibrating machines. And to predict their failure-free operation, it is necessary to establish the law of distribution of the occurrence of failures. So in the work it is justified that the Weibull distribution is accepted for elastomeric elements as the main mathematical model for predicting their resource and operability.

Reliability indicators for the rubber-metal elements of the BRM102 type (rubber-metal blocks), BPM (vibration isolators, rubber-metal) installed on vibration feeders for ore production and delivery were evaluated based on the results of unfinished operational tests for reliability according to the plan /N, R, T/. For the element failure criterion, the appearance of main (fatigue) cracks in the rubber massif was taken. Prediction of reliability indicators of vibration insulators of machines by changing their stiffness is considered on the example of changing the stiffness of rubber-metal elements of BRM102 type.

Keywords: vibrating mining machine, elastic element, reliability indicator, reliability test

Статья поступила в редакцию 15.02.2020

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