

УДК 622.002.5-192:678

Дырда В.И., Шолин М.К.

## **ВЫБОР МОДЕЛЕЙ И КРИТЕРИЕВ ОТКАЗА, РЕЗИНОВЫХ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ МАШИН ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Розглядаються моделі та критерії відмов гумових і гумометалевих віброізоляторів машин, які працюють при циклічному навантаженні.

### **SELECT OF MODELS AND CRITERIONS OF A FAILURE, RUBBER VIBROINSULATORS OF MACHINES AT A LONG-LIVED CYCLIC LOADING**

The models and criterions of failures of rubber and rubber-metal vibroinsulators of machines are considered which work at a cyclic loading.

#### **Классификация резиновых деталей**

Как уже отмечалось [1, 2] резиновые детали играют весьма важную роль в структурных схемах машин, зачастую определяя не только их кинематические и динамические характеристики, но и работоспособность. В инженерной практике существует большое количество разнообразных конструкций резиновых деталей, работающих при самых различных видах статических и динамических нагрузок: сдвиге, сжатии, кручении, сдвиге со сжатием, при сложном напряженном состоянии и т.д. В зависимости от конструктивных особенностей и назначения существуют также их различные классификации. Одна из них [3] предполагает классификацию резиновых деталей по следующим признакам:

- назначению;
- влиянию на надежность работы всего объекта;
- условиям применения;
- конструкции;
- материалам;
- технологии изготовления.

По назначению все резиновые детали можно разделить по следующим группам.

1. Уплотнительные изделия (манжеты, кольца, прокладки, сальники, клапаны, диафрагмы, мембраны, надувные и профильные уплотнители, комбинированные и др.).

2. Силовые изделия (резиновые и резиноармированные муфты и элементы муфт, резиноармированные вкладыши (вставки) для передачи крутящего момента и обеспечения плавности хода транспортных средств, резинометаллические шарниры, втулки, буферы, компенсаторы, кронштейны и др., эластичные опорные шарниры).

3. Транспортные ленты, приводные, клиновые, плоские, зубчатые и комбинированные ремни.

4. Амортизационные, вибро- и звукоизолирующие изделия.

5. Рукава (низкого и высокого давления, напорные, всасывающие, напорно-всасывающие), шланги.

6. Гибкие проставки (гнутые и гибкие патрубки, короткие шланги, семяпроводы, компенсаторы и др.).

7. Резинометаллические подшипники (резиновые и резинометаллические вкладыши подшипников, дейдвудные втулки, опоры трубопроводов и др.).

8. Резиноармированные опорные части и деформационные швы различных сооружений.

9. Противоизносные изделия (звенья гусеницы, барабаны, ванны и корпуса магнитных сепараторов; футеровка скрубберов тепловых электростанций, шаровых мельниц, трубопроводов и центробежных насосов, сита для фракционирования сыпучих материалов и др.).

10. Фрикционные изделия и инструменты (полировально-шлифовальные круги, фрикционные колеса, элементы тормозных систем транспортных средств и др.).

11. Надувные конструкции (легкие спасательные средства, уплотнители люков и трюмов, палатки, аэростаты, плоты, шары, зонды, резервуары, временные легкие сооружения и др.).

12. Защитные изделия (защитные костюмы, маски, резиновые и резиноармированные элементы для защиты от действия различных агрессивных сред, высоких и низких температур, ионизирующих излучений, брызговики, колпачки и др.).

13. Изолирующие изделия и материалы (диэлектрические коврики, оболочки кабелей и проводов, резиновые изоляторы и элементы изоляторов и др.).

14. Токопроводящие изделия и материалы (токопроводники для клавишных аппаратов и пультов, антистатика, заземлители, катодно-анодная защита и др.).

15. Вспомогательные изделия (ручки и педали к транспортным средствам, пылезащитные гофрированные чехлы, колпачки и др.).

16. Пневмооболочки (пневмобаллоны, резинокордные оболочки, камеры и др.).

17. Декоративные изделия (полосы, шнуры, колпачки, профили различных цветов, конфигураций и геометрических размеров).

18. Многофункциональные РТИ. Изделия этой группы одновременно могут выполнять сразу несколько функций, например, силовые, амортизационные, уплотнительные, компенсационные и др. К многофункциональным РТИ можно отнести асфальтоходные башмаки, обтюрирующе-опорные пояса осевого и радиального сжатия, некоторые сильфоны, компенсаторы и др.

19. Шины (авиационные, автомобильные, тракторные и др.).

По влиянию на надежность всего объекта резиновые детали условно можно разделить на четыре категории.

1. Резиновые детали первой категории. Они обеспечивают жизнеспособность объекта. Нарушение или потеря эксплуатационных характеристик такими изделиями приводит к гибели объекта или системы с тяжелыми последствиями, либо к срыву выполнения стратегических задач. К таким изделиям относятся также детали, потеря работоспособности которых приводит к непосредственной гибели людей, если человек и объект рассматриваются как одна система или гибель объекта является прямым следствием гибели людей.

Примером таких изделий могут быть уплотнители, силовые изделия, рукава, шланги и др. для летательных аппаратов, ракет-носителей, кораблей и судов флота, объектов, имеющих стратегическое значение и (или) работающих в критических режимах.

2. Резиновые детали второй категории. Их выход из строя приводит к аварии, остановке работы объекта с тяжелыми последствиями (с последующими человеческими жертвами или без них). После выполнения ремонтно-восстановительных работ с заменой деталей или узла с деталями объект становится работоспособным.

Примером таких изделий могут быть уплотнители, рукава и шланги тормозных систем транспортных средств, летательных аппаратов, эластичные вкладки колесной пары трамвайных тележек, силовые изделия, ремни, транспортерные ленты, резиноармированные опорные части и др.

К этой категории можно отнести также исследуемые в настоящей статье резиновые и резинометаллические виброизоляторы машин:

- категория 2.1: виброизоляторы, которые приводят к отказу машин вследствие выхода их механических характеристик за пределы допускаемых значений (например, вследствие старения резины);
- категория 2.2: виброизоляторы, которые вследствие отказа (старение, усталостные трещины, отрыв резины от металла и другие дефекты) не обеспечивают санитарные нормы по вибрации и звуковому давлению и вся механическая система (машина и система виброизоляции) отрицательно влияет на операторов, что впоследствии может привести к их профессиональным заболеваниям;
- категория 2.3: виброизоляторы, отказ которых не влияет на операторов, но приводит к определенному экономическому ущербу.

3. Резиновые детали третьей категории. Нарушения работоспособности изделий данной категории приводят к остановке работы объекта с незначительными материальными потерями и без человеческих жертв. После недлительного восстановительного ремонта объект становится работоспособным.

Примером таких поломок может быть выход из строя резиновых деталей, выполняющих самые различные функции в транспортных средствах, передающих механизмах и устройствах, сооружениях, стационарных и подвижных объектах и др.

4. К четвертой категории можно отнести детали, потеря работоспособности которых практически никак не сказывается на жизнеспособности объекта. В этом случае нарушается дизайн объекта, создается дискомфорт и др.

К таким изделиям можно отнести, например, молдинги автомобилей, автомобильные коврики, прокладки под зажимные устройства, подставки (присоски) под приборы, аппараты и др.

Как видно, при разработке резиновых деталей необходимо учитывать степень их влияния на судьбу объекта, а также на те последствия, которые могут иметь место в случае гибели объекта или выхода его из эксплуатации.

По условиям применения различают резиновые детали в зависимости от параметров эксплуатации (температура, давление) и типа рабочей и окружающей сред. Например, детали, эксплуатируемые при высоких температурах, называют теплостойкими, при низких температурах — морозостойкими резинотехническими изделиями, эксплуатируемые в средах нефтяного происхождения — маслостойкими и т.д.

По конструкции детали разделяют на резиновые, резиноармированные; (резинометаллические, резинотекстильные, резинопластмассовые), монолитные, полые, губчатые, комбинированные и др.

Резиновые детали также классифицируют в зависимости от применяемых материалов: типов каучуков, марок резин, сырья и армирующих материалов. Например, детали созданные на основе хлоропренового каучука, называют озоностойкими, а детали из резин, содержащих от 30 до 50 массовых частей серы на 100 массовых частей каучука, называют эбонитовыми изделиями,

По технологическому признаку резиновые детали классифицируют на формовые, неформовые и комбинированные.

Как видно из приведенной классификации, требования к деталям могут быть самые различные. Это же касается и материалов, из которых они изготавливаются. Поэтому при разработке материалов необходимо учитывать все отмеченные классификационные признаки, а затем все технические вопросы на всех стадиях решать комплексно. Только в этом случае от резиновых деталей можно

получить максимальный эффект в конкретной конструкции либо при конкретном его применении.

### **Исследование закономерностей механики разрушения резиновых деталей**

В настоящее время существует два основных подхода к проблеме разрушения [1]. Первый — механика разрушения, описывающая макроаспекты разрушения; второй — физика (кинетика) или микромеханика разрушения.

Механика разрушения является основой инженерных методов расчета прочности и долговечности резиновых элементов, находящихся в сложном напряженном состоянии, но в то же время оставляет в стороне физическую кинетику в целом.

Кинетический подход исходит из термофлуктуационного механизма разрушения, предполагающего, что химические связи в материале разрываются в результате локальных тепловых флуктуации, а приложенные напряжения увеличивают вероятность разрыва связей.

Каждый из подходов предоставляет для исследователей группу параметров, которые назовем соответственно микро- и макропараметрами процессов разрушения. К сожалению, в настоящее время не существует единого подхода, органически связывающего указанные выше подходы и параметры. В этой связи необходимы отдельные исследования закономерностей процессов макро- и микро-разрушения.

Определим разрушение резинового (резинометаллического) элемента конструкции как изменение его структуры (любое изменение размеров, формы, свойств), в результате которого он утрачивает способность удовлетворительно выполнять свои функции.

При этом вид разрушения определяется одним или несколькими взаимосвязанными между собой процессами, приводящими к разрушению. Закономерности механики разрушения эластомерных конструкций тяжелых горных машин будем исследовать применительно к каждому виду разрушения.

В целях проведения наиболее общей классификации видов разрушения будем следовать Старки и Коллинзу [4]. Их система

основана на учете трех факторов: характера разрушения, причин разрушения, места разрушения. Каждый вид разрушения будет определяться, таким образом, тем, как проявляется разрушение, что его вызывает и где оно происходит.

С учетом специфики эластомерных материалов и конструкций на их основе названная выше классификация будет выглядеть следующим образом.

Характер разрушения можно описать четырьмя классами:

- 1) упругая (обратимая) деформация;
- 2) пластическая (необратимая) деформация;
- 3) разрыв, раздир или разделение на части;
- 4) изменение свойств материала (физико-механическое старение).

По причинам разрушения можно выделить четыре класса:

- 1) нагрузки: установившиеся; неуставившиеся; циклические; случайные;
- 2) время процесса: незначительное; малое; продолжительное;
- 3) температуры: низкие, комнатные, повышенные; установившиеся, неуставившиеся, циклические, случайные;
- 4) воздействия окружающей среды: химические; радиационные (солнечная радиация, ионизирующее облучение).

По месту разрушения существует два класса разрушения: объемное и поверхностное разрушение, включающее в себя подкласс, характеризующий разрушение на границах контакта резина-металл, резина-воздух и т.д.

Для описания какого-либо отдельного наблюдаемого вида разрушения необходимо выбрать характеристики процесса из приведенного выше перечня.

Ниже приведем наиболее часто встречающиеся на практике виды разрушения резиновых (резинометаллических) элементов конструкций.

Упругая деформация, вызванная действием внешних нагрузок и (или) температур. Этот вид разрушения имеет место, когда упругая (обратимая) деформация элемента, возникающая при действии эксплуатационных нагрузок и температур, становится

настолько большой, что элемент утрачивает способность выполнять предназначенную ему функцию.

Термомеханическое разрушение происходит в основном в массивных элементах при диссипативном разогреве. При недостаточном теплоотводе температурное поле внутри массива не устанавливается, и температура неконтролируемо растет вплоть до разрушения образца.

Усталостное разрушение характеризуется зарождением усталостных трещин, их развитием и отказом резинового элемента конструкции вследствие достижения ими критических величин при весьма умеренных температурах, а также старением и утомлением. Старение характеризуется изменением теплофизических, механических и др. свойств материала в такой степени, которая исключает возможность функционирования элемента в допускаемых нормах.

Износ является процессом постепенного изменения размеров вследствие удаления отдельных частиц с контактирующих поверхностей при их движении относительно друг друга. Износ является в основном результатом механического действия. Это ряд различных процессов, результатом действия которых является удаление материала с контактирующих поверхностей вследствие сложного взаимодействия локальных сдвигов, вдавливания, разрывов и других механизмов.

Абразивный износ характеризуется тем, что частицы эластомера удаляются с поверхности в результате режущего или царапающего действия неровностей более твердой из контактирующих поверхностей или твердых частиц, задерживающихся между поверхностями. При этом малые частицы эластомера отделяются путем разрыва при действии фрикционных сил, когда происходит скольжение между поверхностью эластомера и подложкой.

Разрушение при ударе происходит в результате действия неустановившихся нагрузок, вызывающих такие напряжения или деформации, что элемент не в состоянии выполнить предписанную ему функцию.

Разрушение выпучиванием, или упругая неустойчивость характеризует процесс разрушения потерей устойчивости элемента. В



этих случаях деформация становится резко неоднородной, и элемент разрушается преждевременно.

Тепловое разрушение, или тепловой удар, происходит в том случае, когда температура внешней окружающей среды приводит к резкому изменению свойств материала и даже к его деструктурированию.

Разрушение вследствие влияния внешней активной среды означает: произошли такие необратимые изменения свойств материала, что элемент не может выполнять свои функции.

Коррозионное растрескивание под действием ионизирующих излучений обусловлено тем, что ионизирующие излучения разлагают воздух и создают повышенную концентрацию озона, который вызывает на поверхности деформирования резины острые тонкие трещины. При многократном циклическом нагружении озонные трещины становятся, как правило, концентраторами напряжений, быстро разрастаются.

Поверхностное разрушение проявляется вследствие влияния масел, кислот, щелочей, вредных газов и т.д. Со временем наработки на поверхности резины (к примеру, в случае воздействия повышенного содержания пыли и  $SO_2$ ) появляется слой, состоящий из твердых частиц, пыли и газа, который не исчезает в процессе динамического нагружения. Между отдельными частицами этого слоя появляется сеть очень мелких перекрещивающихся трещин. Эти трещины создают дополнительные очаги концентрации напряжений, особенно в местах стыка резина-металл и способствуют разрушению резиновой конструкции.

Смешанное разрушение характерно для разрушения резиновых (резинометаллических) элементов и происходит в результате одновременного проявления перечисленных выше видов разрушения.

Помимо указанных выше видов разрушения можно назвать и другие: хрупкое разрушение, которое наблюдается в резиновых элементах при сверхвысоких частотах, а также текучесть, ползучесть, вязкое разрушение, фреттинг-усталость, фреттинг-износ и т.д.

Учитывая, однако, специфику работы горных предприятий, обуславливающую экстремальные условия нагружения для эластомерных конструкций горных машин, ниже остановимся на некоторых наиболее характерных указанным условиям видах разрушения и закономерностях их протекания.

Термомеханическое разрушение характеризуется [1] термическим разложением резины в наиболее разогретых точках (значение температуры превышает  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Причинами его являются циклические нагрузки и неуставливающиеся повышенные температуры. В массивных резиновых (резинометаллических) элементах разрушение происходит в основном внутри объема. При этом в центре резинового массива образуется область деструктурированного материала, обычно имеющая форму вытянутой вдоль элемента линзы. Линза растет, жесткость элемента падает, появляются большие остаточные деформации, и несущая способность в целом резко уменьшается. Вследствие наличия теплообмена с окружающей средой и неравномерного распределения поля температур по объему линза растет до определенных размеров, зависящих от размеров элемента, условий теплоотвода и теплообмена с окружающей средой. Дальнейшее разрушение обусловлено действием локальных напряжений внутри резинового массива, инициирующих зарождение и рост трещин, фронт движения которых направлен наружу. Несколько из таких трещин, как правило, распространяются довольно быстро, и это приводит к разделению образца на части.

Указанные общие особенности разрушения реализуются в каждом отдельном случае (условия нагружения, марка резины, форма элемента) по-разному и это соответствует разному ресурсу наработки резиновых элементов (от нескольких часов до их десятков) [1].

Исследование закономерностей усталостного разрушения резиновых элементов горных машин с целью создания прикладных методов их расчета представляет наибольший интерес, так как конечной задачей всех исследований в любом случае является создание долговечных и надежных конструкций.

Усталостное разрушение характеризуется длительностью протекающих процессов, изменением структуры материала вследствие протекания различных химических реакций, происходящих внутри и на поверхности резинового элемента и приводящих к старению материала, изменению его теплофизических и механических свойств.

В общем случае комплекс экспериментальных исследований [1] позволяет сформулировать следующие закономерности усталостного процесса разрушения:

1) разрушение деталей в общем случае происходит в три стадии: время формирования трещины ( $\tau_1$ ), время медленного развития трещины ( $\tau_2$ ), время быстрого развития трещины ( $\tau_3$ );

2) активными инициаторами трещин являются случайные дефекты, рассеянные по объему и поверхности, а также области, содержащие перенапряженные и значительно разогретые точки массива;

3) все трещины можно условно разделить на нераспространяющиеся и мобильные;

4) трещины первоначально развиваются в основном на поверхности перпендикулярно главным растягивающим и максимальным касательным напряжениям;

5) кинетика развития трещин происходит по-разному и зависит от таких факторов, как условия нагружения, внешняя среда, физико-механические свойства и т.д.;

5) скорость роста трещин в какой-то мере характеризует поврежденность материала: если поврежденность на поверхности больше, чем в массиве, то скорость роста трещины на поверхности будет соответственно больше;

6) длительное утомление существенно изменяет механизм роста трещин: при наработках до предкритического момента трещины могут расти вглубь с несколько большей скоростью, чем на поверхности; это связано, прежде всего, с повреждаемостью материала: повреждаемость внутри массива равна повреждаемости на поверхности или превосходит ее;

7) массивные резиновые и резинометаллические изделия удовлетворительно противостоят действию кислорода, озона и других активных агентов благодаря своему большому объему; поврежденный наружный слой не оказывает существенного влияния на физико-механические характеристики, но все же сокращает срок их службы на 5-10 % по сравнению с нормальными условиями эксплуатации;

8) топография поверхности разрушения характеризуется многими особенностями, в том числе сколом, гребневидностью, бороздками, вторичными трещинами, зонами истирания, остановками фронта трещины, наличием крупного и мелкого размера шероховатых и гладких зон и т.д.;

9) долговечность резиновых элементов в значительной степени зависит от условий нагружения и эксплуатации;

10) кривые долговечности в зависимости от величины амплитуды нагружения напоминают кривые Веллера;

11) особую роль при усталостном разрушении играет поверхность раздела резина-металл, часто наблюдается отрыв металлических пластин от резины, она является инициатором появления трещин;

12) продолжительности трех стадий разрушения при отсутствии дефектов, инициаторов трещин, находятся в зависимости

$$\tau_1 \gg \tau_2 \gg \tau_3;$$

13) долговечность массивных элементов в ряде случаев можно отождествить со временем формирования магистральных трещин ( $\tau_1$ );

14) основными параметрами, характеризующими способность элементов выполнять заданные конкретные функции, являются жесткостные и диссипативные во всем диапазоне их изменения и в зависимости от различных факторов;

15) значение жесткости массивных элементов при деформациях сдвига и сжатия с увеличением магистральных трещин уменьшается;

16) значение коэффициента диссипации энергии при деформациях сдвига и сжатия с появлением магистральных трещин растет.

Как уже отмечалось выше, смешанный тип разрушения характеризуется наличием признаков, свойственных разным типам; и останавливаться на нем подобно не будем. Примеры его осуществления приведены в [1].

Известно также [1], что любая внешняя агрессивная среда активно влияет на разрушение резиновых элементов. В ряде случаев ее действие может оказаться доминирующим.

На резиновые элементы, помимо ионизирующих излучений [1], оказывает влияние и другие агрессивные среды: кислоты, щелочи, масла, вредные газы, солнечная радиация и т.д.

На основании исследования [1] можно утверждать, что массивные резиновые элементы удовлетворительно противостоят умеренному действию активных агентов благодаря своему большому объему. Поврежденный наружный слой не оказывает существенного влияния на физико-механические характеристики, но все же способствует разрушению деталей, уменьшая их общую долговечность на 5-10 %.

### **Основные факторы, определяющие работоспособность резиновых деталей машин, работающих при длительных циклических нагрузках**

К таким машинам относят, как правило, все типы вибрационных машин (грохоты, питатели, конвейеры, вибромельницы и т.д.), а также машины, которые в силу специфики кинематической схемы и технологии режима в той или иной мере испытывают постоянные циклические нагрузки (мельницы, дробилки, окомкователи, смесители, вентиляторы и т.д.). Резиновые детали таких машин испытывают действие самых разнообразных факторов, характеризующихся практически всеми видами энергии: механической, тепловой, химической, электромагнитной. При этом возникает ряд процессов, отрицательно сказывающихся на работоспособности изделий, ухудшающих их начальные параметры.

Эти процессы связаны со сложными физико-химическими явлениями и приводят к разным видам разрушения или, в терминах теории надежности, к разным видам повреждений, изменению выходных параметров и отказам. Таким образом, прежде всего, необ-

ходимо установить и проанализировать так называемые выходные параметры, а затем применительно к ним решать задачу исследования основных факторов, влияющих на работоспособность эластомерных элементов конструкций.

Каждый отдельный элемент обладает, как правило, рядом характерных эксплуатационных свойств и параметров, обусловленных функциональным назначением этих деталей и их ролью в рассматриваемой конкретной машине.

Сказанное выше наглядно иллюстрируется данными, приведенными в таблице 1 для вибрационных машин и машин, испытывающих в процессе эксплуатации постоянные вибрации.

Таблица 1 – Эластомерные элементы и их эксплуатационные параметры

Назначение элемента		Примеры выполнения	Эксплуатационные показатели
наименование	основные признаки		
Основные	Определяют режим работы вибрационных машин и характеризуют их структурно-динамическую схему	Резинометаллические блоки	Усталостная прочность; жесткость; диссипативный разогрев
Опорные (поддерживающие)	Соединяют рабочий орган с основанием	Резинометаллические шарниры	Диссипативный разогрев; усталостная прочность; жесткость; несущая способность
Приводные	Облегчают запуск вибрационных машин, снижают пусковые нагрузки на элементы конструкций, регулируют настройку машин	Резинометаллические блоки, цилиндры, шарниры	жесткость; диссипативный разогрев
Виброизолирующие	Снижают динамические нагрузки на фундамент, уменьшают вибрацию и шум	Резинометаллические блоки, цилиндры, элементы сложной формы типа ВР, слоистые типа ВРМС	Жесткость; устойчивость; несущая способность; структурная устойчивость

В табл. 1 резиновые и резинометаллические элементы машин классифицированы согласно своему функциональному назначению и выделены их основные параметры, характеризующие способность выполнять требуемые функции.

Данные таблицы и результаты исследований, полученные ранее [1], свидетельствуют о том, что основными выходными параметрами таких элементов следует считать: прочность, жесткость, температуру диссипативного разогрева и несущую способность.

Применительно к другим машинам и, соответственно, другим условиям эксплуатации, эти параметры могут быть другими. Так, для защитных покрытий необходимо выделить параметры, характеризующие абразивный износ, т.е. износостойкость и т.п.

Выходные параметры в свою очередь могут быть связаны вполне определенным образом функционально с другими параметрами — модулями упругости и сдвига, динамическим модулем, модулем потерь, коэффициентом механических потерь и т.д. Они косвенно характеризуют работоспособность изделия, и в ряде случаев исследования осуществляются применительно к ним. Упомянутые исследования определенной группы параметров относятся к методам так называемой параметрической теории надежности, в которой отказ трактуют как выход параметров (в нашем определении выходных), определяющих работоспособность изделия, за некоторые установленные пределы.

Значения установленных пределов регламентируются в соответствующей технической документации. Применительно к резиновым и резинометаллическим элементам примерами могут служить отраслевые стандарты на резинометаллические блоки и шарниры.

Совершенно очевидно, что прежде чем рекомендовать какие-то предельные значения выходных параметров, необходимо их теоретически и экспериментально обосновать, осуществив для этого программу целенаправленных исследований.

В первую очередь необходимо установить и проанализировать основные факторы, влияющие на поведение и выходные параметры эластомерных элементов конструкций.

В самом общем случае таких факторов достаточно много, и даже слишком много, чтобы можно было разумно исследовать каждый фактор индивидуально. В этой связи их необходимо классифицировать. Естественно, что классификация может быть разной в зависимости от признаков, по которым она производится.

Согласно Хевиленду [5] и изложенным выше подходам к исследованию проблем надежности все факторы, влияющие на надежность исследуемого объекта, могут быть разделены на две группы. Одна из групп содержит факторы, влияние которых может быть оценено статистически, другая — факторы, связанные с параметрами (показателями) надежности функционально.

Из этих двух групп остановимся на второй, нас будет интересовать выявление основных функциональных связей, определяющих изменения выходных параметров изделия. Основные факторы, ответственные за изменение выходных параметров в указанном выше смысле, сгруппируем следующим образом: внешние факторы и внутренние факторы.

Внешние факторы характеризуют влияние окружающей среды и условия нагружения. Последние, вообще говоря, также принадлежат окружающей среде: все вместе можно определить как условия эксплуатации, Удобнее, однако, и прежде всего с инженерной точки зрения, рассматривать условия нагружения в виде отдельного фактора, а к окружающей среде отнести все остальные факторы, являющиеся внешними по отношению к рассматриваемому объекту.

К основным факторам, характеризующим окружающую среду и оказывающим существенное влияние на прочность, упругие и диссипативные характеристики резиновых деталей, относятся: воздействие масел, химически активной среды, солнечного и радиоактивного облучения, а также температуры окружающей среды.

Условия нагружения относятся к факторам механического воздействия и характеризуются обычно значениями амплитуды и частоты нагружения, величиной приложенных нагрузок.

Внешние факторы, как уже отмечалось выше, оказывают различное влияние на долговечность и надежность резиновых и резинометаллических элементов конструкций. Изменения, происходя-



щие при этом с элементами, их свойствами и выходными параметрами, можно отнести к двум видам:

1) обратимые изменения, временно изменяющие характеристики элементов в некоторых пределах без тенденции прогрессивного ухудшения;

2) необратимые изменения, приводящие к прогрессивному ухудшению характеристик с течением времени.

Обратимые изменения могут возникать в результате упругих деформаций, колебания температуры окружающей среды и т.д. Примерами необратимых изменений являются старение, усталость и т.д.

Первый вид изменений не приводит, как правило, к существенной дестабилизации свойств и параметров, поэтому наибольший интерес представляют необратимые изменения, обуславливающие нестабильность свойств и выходных параметров, и приводящие в конечном итоге к отказам.

К внутренним факторам, влияющим на работоспособность эластомерных элементов, отнесем конструкционные (форма и способ крепления к примыкающим частям машины) и технологические (материал, изготовление).

Выбор формы и способов соединения эластомерных элементов с окружающими их деталями машины существенным образом влияет на скорость и степень потери работоспособности элементом в зависимости от его функционального назначения.

Все компоненты технологического процесса — способ и режим вулканизации, применяемое оборудование, методы контроля определяют в первую очередь показатели качества изделия (точность изготовления, качество поверхности, структура и др.), а в конечном итоге и его выходные параметры (износостойкость, усталостная прочность, жесткость и др.). Технологические факторы оказывают непосредственное и существенное влияние на показатели надежности, хоть эти связи сложны и многоэтапны и не являются очевидными.

В результате исследования основных факторов, действующих на резиновые элементы тяжелых горных машин при экстремальных

условиях нагружения и оказывающих преобладающее влияние на их работоспособность, связь между ними и потерей работоспособности элементов может быть выражена схематично (рис. 1).

Таким образом, необходимыми этапами исследований является установление функциональных зависимостей между основными факторами, действующими на резиновые элементы конструкций и их выходными параметрами с учетом изменения состояния и повреждения материала, а также нестабильности его свойств.

### **Причины и характер отказов резиновых деталей**

Специфика исследований причин и характера отказов резиновых деталей и покрытий горных машин обусловлена спецификой эксплуатации последних. Современные горные машины работают в тяжелых условиях, связанных с ограниченностью габаритов, абразивностью горных пород, запыленностью атмосферы, воздействием агрессивных шахтных вод. В подземных условиях для них существует опасность обрушения горных пород; на открытых разработках для горной техники характерен широкий диапазон изменения температур.

Указанные специфические особенности эксплуатации горных машин приводят к тому, что наибольшее число отказов приходится на детали, воспринимающие большие динамические нагрузки. К



таким деталям относятся и упругие элементы, выполненные из резиноподобных материалов, условия эксплуатации которых можно характеризовать как экстремальные. Все перечисленные факторы накладывают свой неповторимый отпечаток на характер отказов и должны быть в комплексе учтены при формировании критериев отказов.

На современном этапе возможна классификация отказов, основанная на внешних признаках, а также с учетом механизмов разрушения объектов по физическим и физико-химическим процессам разрушения.

Внешний или феноменологический подход позволяет объединить причины отказов резиновых и резинометаллических элементов в четыре группы: конструктивные, технологические, эксплуатационные дефекты, старение (износ). Все отказы элементов связаны с происходящими в них процессами разрушения, поэтому в дальнейшем попытаемся связать причины отказов с причинами разрушения, а также с возможными их последствиями. В табл. 2 представлены результаты анализа данных, полученных на основании литературных источников, а также длительных стендовых и натурных испытаний, методика проведения которых подробно описана в [1].

В пояснение к табл. 2 еще раз следует отметить, что последствия отказов резиновых и резинометаллических элементов анализируются применительно к горным машинам, деталями и узлами которых они являются. При этом под экономическим ущербом понимается следующее: повышенные простои в ремонте; работа на пониженных режимах; работа с ухудшенными параметрами. Если затраты на ремонт (замену) элемента находятся в пределах установленных норм, то такой отказ классифицируется «без последствий».

Проиллюстрируем далее табл. 2 некоторыми примерами. Так, примерами конструкционных дефектов могут служить: деталь, которая не имеет возможности изменять форму в процессе деформирования; деталь, рассчитанная на деформирование растяжением; несоответствие значений жесткости и температуры диссипативного разогрева номинальным; неправильный выбор резины и т.д.

Таблица 2 – Классификация причин отказов резиновых и резинометаллических элементов

Признаки разрушения	Причины разрушения	Причины отказов	Последствия отказов
Быстрый разогрев	Диссипативный разогрев	Конструкционные, эксплуатационные	Аварийные; экономический ущерб
Охрупчивание резинового массива	Действие внешнего температурного поля, внешней среды	Эксплуатационные, старение, утомление	Без последствий; экономический ущерб
Набухание резинового массива	Действие внешней агрессивной среды (масло, щелочь и т.д.)	Эксплуатационные, старение, утомление	Без последствий; экономический ущерб
Разрыв резинового массива; вырыв резинового массива	Перенапряжение; ударные нагрузки	Конструкционные, эксплуатационные	Аварийные; экономический ущерб
Выпучивание, потеря устойчивости	Перенапряжение	Конструкционные, эксплуатационные	Аварийные; экономический ущерб
Отслаивание резинового массива от металлической арматуры	Перенапряжение; повышенный разогрев; недостаточная прочность связей	Конструкционные; технологические; эксплуатационные	Аварийные; экономический ущерб
Изменение жесткости резины, физико-механических свойств резины	Перевулканизация; недовулканизация; воздействие внешней агрессивной среды, внешнего поля температур, длительные циклические нагрузки	Технологические, эксплуатационные	Без последствий; экономический ущерб
Коррозия металлической арматуры, появление на поверхности резинового массива сетки мелких трещин	Воздействие внешней агрессивной среды	Технологические, эксплуатационные	Без последствий; экономический ущерб
Появление и рост магистральных трещин	Длительные циклические нагрузки, воздействие внешней агрессивной среды	Старение, утомление, износ	Без последствий; экономический ущерб

Примеры технологических дефектов: недовулканизация, недостаточная прочность соединения резина-металл, перекос металлической арматуры и т.д.

Эксплуатационные дефекты характеризуются нарушением правил и режимов эксплуатации, в частности, резким увеличением амплитуды деформации, резким изменением температуры окружающей среды.

В случае, когда деталь правильно спроектирована, изготовлена, эксплуатируется согласно установленным техническим условиям, остается одна причина отказа: физико-химические изменения материала, которые при длительном нагружении проявляются в изменении основных свойств и параметров детали, в появлении и развитии магистральных трещин.

На практике время безотказной работы резиновых и резино-металлических элементов определяется вариациями конструктивного качества, качества изготовления, условий эксплуатации и процессами старения.

Классификация отказов резиновых и резинометаллических элементов может быть продолжена по разным признакам [6]: устойчивый (не может быть самоустранин); очевидный (разрыв массива, трещины); скрытый (изменение жесткости); полный, неполный, частичный (по степени влияния на работоспособность); зависимый и независимый (по связи с другими отказами); внезапный и постепенный (по характеру процесса проявления) и т.д.

В дальнейшем, в связи с необходимостью построения моделей отказов, наибольший интерес представляют отказы, характер которых определяется как постепенный.

Такие отказы, называемые часто износowymi, отражают естественные термодинамически обусловленные процессы разрушения (возрастание энтропии) объектов при их нагружении и взаимодействии со средой. Характер таких отказов обусловлен усталостным разрушением. Ниже остановимся на некоторых особо важных моментах.

Многочисленные испытания позволяют сделать вывод, что трещины при усталостном разрушении появляются преимущественно на поверхности, при этом в большинстве случаев вдоль границы резина-металл (если такая присутствует), затем траектория движения их изменяется, рост продолжается по направлению к центру, затем вглубь.

На рис. 2 показан резино-металлический виброизолятор типа ВРМ903М, эксплуатируемый в течение 16 лет в системе виброизоляции вихревого смесителя в условиях Северного горно-обогатительного комбината (г. Кривой Рог).

Усталостные трещины на стыке резина-металл появились через 5-6 лет эксплуатации; их рост осуществляется на свободной поверхности резины и вглубь массива на 5-6 мм. Такие трещины не оказывали практически заметного влияния ни на жесткостные параметры, ни на долговечность [1].

У резинометаллических шарниров трещины могут пересекать весь массив резины от одной металлической обоймы до другой, затем, с гораздо меньшей скоростью, трещины начинают развиваться вглубь. При этом элементы с трещинами еще долгое время сохраняют свою работоспособность. Это свойство, характеризующее износостойкость, является весьма ценным для промышленной эксплуатации, так как исключает внезапный отказ горных машин и дает возможность заменить дефектную деталь в плановом порядке, т.е. отказ не чреват катастрофическими последствиями.

В связи с тем, что наиболее актуальным в настоящее время является исследование работоспособности длительно работающих деталей, возникает вопрос о стабильности их жесткостных свойств. Для некоторых резин (типа 51-1562) стабильность жесткостных

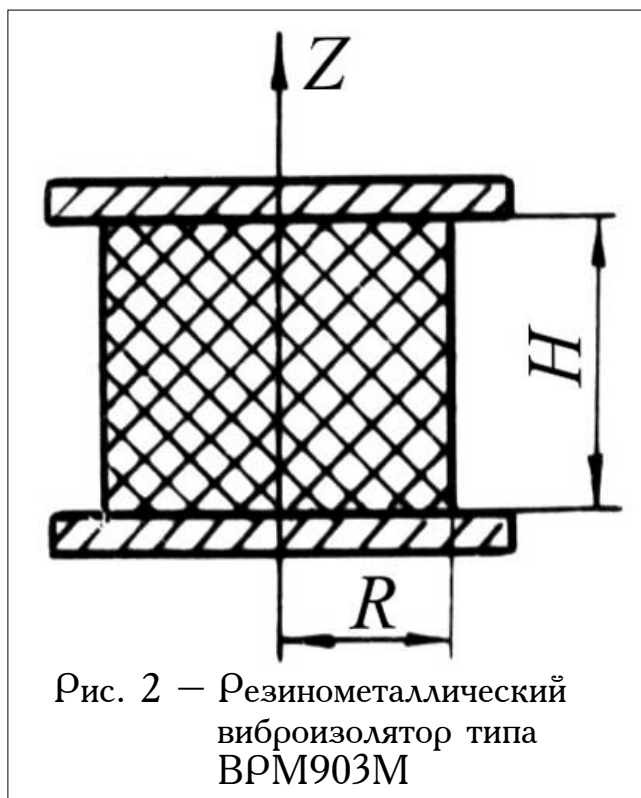


Рис. 2 – Резинометаллический виброизолятор типа ВРМ903М

свойств сохраняется на протяжении 10-15 тыс. часов (наблюдается возрастание модуля на 10-15 %). Для других, средне- и сильнонаполненных резин, характерно изменение жесткостных характеристик на 50-60 %. В этой связи необходимо своевременное прогнозирование механических свойств элементов, особенно при их использовании в резонансных машинах, и построение соответствующих критериев и моделей отказов.

В частности, анализ причин и последствий отказов эластомерных элементов, выполненный в настоящем разделе, позволяет сформулировать критерии отказов резиновых и резинометаллических элементов следующим образом:

- 1) разделение на части вследствие роста усталостных трещин;
- 2) достижение усталостными трещинами критических размеров;
- 3) отслаивание резинового массива элемента от металлической арматуры;
- 4) 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 влечет за собой значительное изменение амплитуды колебаний конвейера.

В общем случае критерий отказа может быть выбран из четырех приведенных выше на основании анализа последствий отказа. При этом, очевидно, что в критерий отказа вкладывается существенным образом элемент субъективности, но в каждом конкретном случае он может быть только один для всех показателей надежности исследуемого объекта.

### **Выбор модели отказов резиновых деталей**

Наиболее достоверные оценки показателей надежности получают при использовании результатов эксплуатационных наблюдений и испытаний на надежность, 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 незавершенности таких испытаний. Поэтому важно иметь возможность определять показатели надежности до завершения эксплуатационных испытаний.

Основная задача при расчете показателей надежности 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, 7, 8] 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 постепенные отказы, связанные с усталостным разрушением резины, ее 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, с тем, чтобы исключить их или правильно учитывать при выборе модели отказов и расчете показателей надежности. Игнорирование же неоднородности приводит обычно к серьезным ошибкам в оценке показателей надежности.

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 [7-13], плотность распределения вероятности которого задается выражениями



$$f(t) = \frac{b}{a} (t/a)^{b-1} \exp[-(t/a)^b], \text{ или } f(t) = b\lambda \cdot t^{b-1} \exp[-\lambda \cdot t^b], \quad (1)$$

где  $b$  — параметр, характеризующий форму данного распределения;

$a$  — параметр масштаба;

$t$  — время наработки;

$$\lambda = 1/a^b.$$

Основные показатели надежности в этом случае определяют параметрическим методом по вычисленным оценкам параметров  $\hat{a}$  и  $\hat{b}$  распределения (1).

При эксплуатации эластомерных элементов на практике, как правило, наблюдаются отказы и в начальный период еще до начала усталостного разрушения основной массы элементов по случайным причинам, приводящим к неоднородности данных и наличию различных видов отказов в данной выборке. В этом случае общей математической моделью распределения времени безотказной работы является суперпозиция нескольких законов распределения для отдельных видов отказов, плотности распределения которых хорошо описываются одним из простых законов, в общем случае различных типов.

Плотность распределения смеси распределений представляется в виде [14]

$$W(t, a) = \sum_{j=1}^k \beta_j f_j(t, a_j), \quad (2)$$

где  $k$  — число компонент в смеси, т.е. количество функций  $f_j(t, a_j)$ , входящих в функцию  $W(t, a)$ , количество видов отказов;

$\beta_j$  — весовые коэффициенты составляющих смесь распределений  $f_j(t, a_j)$ , удовлетворяющие условию  $\sum_{j=1}^k \beta_j = 1$ ;  $f_j(t, a_j)$  —

плотности распределений составляющих законов;

$a_j$  — векторы параметров составляющих законов;

$a$  — вектор параметров суперпозиции законов

$a$  — вектор параметров суперпозиции законов

$$a = \{a_1, a_2, \dots, a_j, b_1, b_2, \dots, b_j\}.$$

На практике обычно используют смеси конечного типа, т.е. количество составляющих распределений  $f_j(t, a_j)$  — конечно, в противном случае будет не определена размерность пространства неизвестных параметров.

Интерпретация  $j$ -го компонента смеси как  $j$ -го искомого класса (сгустка, скопления) обуславливает наложение дополнительного ограничения, требующего односторонности (одновершинности) составляющих плотностей распределения  $f_j(t, a_j)$ . Этому требованию отвечают распределения экспоненциальное, нормальное, Вейбулла, которые наиболее часто используются в качестве математических моделей ресурса работоспособности резиновых деталей [10-13].

Экспоненциальное распределение является хорошей моделью внезапных отказов резиновых деталей, нормальное и Вейбулла распределения — моделью постепенных отказов, являющихся следствием усталостного разрушения резины, ее старения и износа. Поэтому эти распределения будем рассматривать как наиболее вероятные составляющие смеси распределений, и все необходимые математические выкладки будут приведены для указанных распределений.

С достаточной для практических целей точностью, оценку показателей надежности технических систем можно проводить с использованием смеси распределений, состоящих из 2-3 компонент при известных законах распределения [14].

В нашем случае, если некоторая часть элементов имеет скрытые технологические дефекты — «слабые места», а основная масса элементов, выходит из строя по причине износа, то математическая модель распределения времени безотказной работы выбрана в виде суперпозиции двух распределений: экспоненциального для дефектных экземпляров и распределения Вейбулла, отвечающего характеру износа (старения) для остальных. Плотность распределения смеси при этом будет иметь вид

$$W(t, a) = \beta_1 \lambda_1 \exp(-\lambda_1 t) + (1 - \beta_1) \lambda_2 b_2 t^{b_2 - 1} \exp(-\lambda_2 t^{b_2}) \quad (3)$$

или двух распределений Вейбулла

$$W(t, a) = \beta_1 \lambda_1 b_1 t^{b_1 - 1} \exp(-\lambda_1 t^{b_1}) + (1 - \beta_1) \lambda_2 b_2 t^{b_2 - 1} \exp(-\lambda_2 t^{b_2}) \quad (4)$$

где  $\beta_1$  — доля внезапных отказов;

$\lambda_1, b_1, \lambda_2, b_2$  — параметры составляющих смесь распределений;

$t$  — наработки на отказ.

Таким образом, задача оценки показателей надежности ЭЭК по неоднородным данным с учетом различных видов отказов сводится к задаче описания наработок на отказ конечной смесью распределений вида (2)-(4).

Разрушение резины обычно происходит постепенно и формирование отказов резинометаллических элементов связано с постепенным накоплением повреждений: усталостных, износа, старения и т.д. Математическим отражением такого факта служат модели постепенных отказов, которые описывают ухудшение выходных параметров изделия, происходящее в процессе его эксплуатации. Решение задачи оценки и прогнозирования надежности в этом случае состоит в установлении выходного показателя (показателей), определяющего работоспособность элементов, оценку рассеяния начального значения этого показателя и изменения его величины во времени вплоть до отказа. Отказ возникает при достижении выходным параметром  $x(t)$  своего предельно допустимого (критического) значения  $X_{max}$ . Вероятность безотказной работы  $P(t)$  элемента на заданную наработку  $t=T$  определится законом распределения выходного параметра  $f_x(x)$ , как вероятность невыхода его за допустимую границу  $X_{max}$ , т.е.

$$P(t = T) = P(X \leq X_{max}).$$

В общем случае временная зависимость выходного параметра имеет квазидетерминированный вид

$$x = f(u) = f[u(t)], \quad (5)$$

где  $u(t)$  — обычно случайная функция степени повреждения;

$f(\dots)$  — описывает детерминированную зависимость, рассматривается функция случайного аргумента.

Оценка показателей надежности в этом случае сводится к нахождению плотности распределения функции  $f_x$  по закону рас-

пределения ее аргумента  $f_u$ . Общий метод решения таких задач рассматривается в курсах теории вероятностей [15].

Основная трудность состоит в обосновании выбора зависимости (5). Наиболее распространенный случай — выходной параметр соответствует линейной зависимости, а распределение ее аргументов нормальному закону. При более сложных или эмпирических законах распределения бывает трудно получить аналитические выражения для получения функций  $f(t)$  или  $P(t)$ .

Основные виды случайных функций изменения возрастающих выходных параметров изделий, их графики и формулы для расчета основных показателей надежности приведены в [16-18].

В каждом конкретном случае в качестве выходного параметра выбирают наиболее ответственный за работоспособность изделия параметр, большое значение при этом имеет сложность (а зачастую и практическая возможность) определения или визуального наблюдения за его изменением в реальных условиях эксплуатации.

В соответствии со сформулированными выше критериями отказов резиновых деталей в качестве выходного параметра для них может быть использован коэффициент жесткости, температура диссипативного разогрева, а также изменение во времени наиболее важных характеристик детали — модуля сдвига  $G(t)$  и коэффициента диссипации энергии  $\psi(t)$ . Так, приняв за выходной параметр изменение во времени жесткости, а за отказ достижение жесткостью своего предельно допустимого (критического значения), показатели надежности определяют по формулам [16-18]. Данный методический подход может быть использован при расчете показателей надежности на стадии проектирования резинометаллических элементов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. — Киев: Наук. думка, 1988. — 232 с.
2. Дырда В.И., Чижик Е.Ф. Резиновые детали в машиностроении. — Москва; Днепропетровск: Полиграфист, 2000. — 581 с.
3. Хорольский М.С. Основные итоги деятельности УНКТИ «ДИНТЭМ» по созданию эластомерных материалов и изделий на их основе во втором тысячелетии // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. Трудов. — Днепропетровск, 2001. — Вып. 24. — С. 26-44.
4. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание,

- предотвращение. — М.: Мир, 1984. — 624 с.
5. Хевиленд Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность. — М.: Энергия, 1966. — 232 с.
  6. Проников А.С. Надежность машин. — М.: Машиностроение, 1978. — 592 с.
  7. К оценке показателей надежности резинотехнических элементов транспортно-технологических машин / Дырда В.И., Твердохлеб Т.Е., Мазнецова А.В. и др.: АН УССР. Ин-т геотехн. механики. — Днепропетровск. 1987. — 7 с. — Библиогр. 11 назв. — Деп. в ВИНТИ 03.08.87, № 5547. — В87.
  8. Прогнозирование надежности и долговечности резинотехнических виброизоляторов технологического оборудования горно-обогатительных фабрик / Дырда В.И., Коваленко В.Я., Мазнецова А.В. и др. // Повышение надежности горных машин. — Киев: Наук. думка, 1991. — С. 133-138.
  9. Дырда В.И., Мазнецова А.В. К вопросу оценки надежности и долговечности резиновых элементов тяжелых горных машин // Надежность и долговечность машин и сооружений. — 1987. — Вып. 18. — С. 12-22.
  10. Карбасов О.Г., Меняк В.Я. Математическая модель распределения вероятности отказа клиновых вентиляторных ремней // Каучук и резина. -1969. —№ 1. — С. 35-38.
  11. Меняк В.Я., Горелик В.М., Карбасов О.Г. Влияние вида отказа резиновых деталей на параметры математической модели надежности // Каучук и резина. — 1973. — № 5. — С. 39-44.
  12. Горелик В.М., Меняк В.Я., Шляхман А.А. Применение распределения Вейбулла при оценке надежности резинотехнических изделий // Производство шин, РТИ и АТИ. -М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1975. —№ 1. —С. 47-50.
  13. Карбасов И.М., Подкорытова Г.А. Определение надежности РТИ по результатам незавершенных испытаний с помощью ЭВМ «Мир-2» // Применение математических методов и электронно-вычислительной техники в научных исследованиях в области резины. —М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1982. —С. 32-43.
  14. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. — 607 с.
  15. Ллойд Д.К., Липов М. Надежность: организация исследования, методы, математический аппарат. —М.: Советское радио, 1964. — 688 с.
  16. Временное практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению надежности машиностроительной продукции. —М.: ВНИИНМАШ, 1986. — 65 с.
  17. Надежность машиностроительной продукции: Практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. —М.: Изд-во стандартов, 1990. — 328 с.
  18. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. —Взамен ГОСТ 27.201-81: ГОСТ 27.502-83: ГОСТ 27.503-81: ГОСТ 27.504-84: введ. 01.01.91 до 01.01.95. —М.: Изд-во стандартов, 1990. —132 с.