

15. ГОСТ 269-66. Резина. Общие требования к проведению физико-механических испытаний. -Взамен ГОСТ 269-53; Введ. 01.01.66 до 01.01.86. -М.: Изд-во стандартов, 1981. – 11 с.
16. ГОСТ 9982-76. Резина. Методы определения релаксации напряжения при сжатии. -Взамен ГОСТ 9982-62, ГОСТ 11099-64 в части метода определения напряжения; Введ. 01.01.77 до 01.01.88. - М.: Изд-во стандартов, 1976. -10 с.
17. ГОСТ 1104-74. Прикладная статистика. Определение оценок и доверительных границ для параметров нормального распределения. -Введ. 01.07.79 до 01.01.90. –М.: Из-во стандартов, 1974. – 20 с.
18. ГОСТ 11053-75. Резина. Методы определения условно-равновесного модуля. – Взамен ГОСТ 11053-64; Введ. 01.01.78 до 01.01.88. -М.: Из-во стандартов, 1976. – 3 с.
19. ГОСТ 23326-78. Резина. Методы динамических испытаний. Общие требования; Введ. 01.01.80 до 01.01.90. -М.: Из-во стандартов, 1979. – 14 с.
20. ГОСТ 9.713-86. Метод прогнозирования изменения свойств при термическом старении; Введен с 01.01.1988 г. -М.: Издательство стандартов, 1987. – 8 с.
21. ГОСТ 9.707-81. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение; Веден с 01.01.1983 г. - М.: Издательство стандартов, 1982. -56 с.
22. ГОСТ 263-75. Резина. Метод определения твердости по Шору А; -Введ. 01.01.1980. - М.: Из-во стандартов, 1984. -4 с.
23. Бартенев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. -М.; Л.: Химия, 1964. -387 с.
24. Румшицкий Л.З. Элементы теории вероятностей. -М.: Наука, 1976. -248 с.

УДК 625.143.42-783.473

В.В. Говоруха

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВЯЗКОУПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ С УЧЕТОМ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Розглядаються фізичні та математичні моделі механічного деформування гумових прокладок рейкового шляху з урахуванням нестабільності їх фізико-механічних властивостей з часом експлуатації. Викладено алгоритм прогнозування довговічності таких прокладок за умов, що модуль пружності та коефіцієнт дисипації енергії є функціями часу.

**Введение.** Ранее [1-3] отмечалась важная роль вязкоупругих элементов в снижении динамических нагрузок рельсового пути и стрелочных переводов на железобетонном основании. Такие элементы, или так называемые резиновые прокладки, обычно представляют собой прямоугольную призму с пазами на одной стороне рабочей поверхности, оси которых параллельны торцевым поверхностям прокладки; для крепления к шпале имеются специальные отверстия прямоугольной формы. Прокладки эксплуатируются при температуре окружающей среды  $-55 \div 70$  °С, действии активных веществ (осевое масло, различные растворы), повышенной концентрации озона и кислорода воздуха. Прокладки испытывают постоянные нагрузки от рельсового пути, эпи-

зодические поездные динамические нагрузки и истирание (в настоящей работе не рассматривается) от силы угона и возврата рельсы от движения колеса, а также от неравномерности деформации самой прокладки и скольжения ее по подошве рельсы.

Прежде, чем перейти к прогнозированию долговечности прокладок, рассмотрим весьма важное их свойство, проявляющееся как в процессе длительного хранения, так и при эксплуатации. Речь идет о процессе старения, т.е. нестабильности физико-механических свойств материала во времени и от действия внешней агрессивной среды [4-50].

**Нестабильность механических свойств резины.** В процессе хранения или длительной эксплуатации физико-механические свойства резиновых прокладок не остаются постоянными. Под действием напряжений и внешней агрессивной среда реологические, теплофизические и усталостные характеристики резины с течением времени изменяются. Такая временная нестабильность присуща всем резинам, впрочем как и всем материалам, и на практике получила общее название старения. Обычно считают, что старение может происходить и в отсутствие механического поля; такие немеханические факторы как тепло, свет, излучения высоких энергий различного рода, агрессивная среда изменяют структуру резины и вызывают в ней реакции деструкции и структурирования. Если же наряду с факторами немеханического происхождения действует механическое поле, то напряжения активизируют химические реакции, способствуют более глубоким изменениям структуры материала и, как правило, ускоряют процесс старения. Поэтому при длительном статическом нагружении между понятиями старение и утомление не делают особого различия. При циклическом нагружении также трудно выделить долю старения в общем механизме разрушения, т.е. глобального изменения структуры резины, приводящего к появлению магистральных трещин и отказу образца.

Такое положение привело к тому, что ни в периодической литературе, ни в государственных стандартах бывшего СССР, а именно ими и пользуются до настоящего времени, ни в стандартах других стран четкого определения этого термина нет. Обычно согласно государственным стандартам устанавливается метод прогнозирования изменения свойств вследствие старения образцов при хранении в воздушной среде в недеформированном или деформированном состоянии в условиях, исключающих воздействие прямых солнечных лучей и атмосферных осадков. Как правило, сущность метода заключается в

определении характерного показателя свойств резины, изменяющегося в процессе старения, и расчета коэффициента, характеризующего зависимость скорости изменения показателя от времени, температуры или концентрации агрессивной среды; в дальнейшем полученные результаты экстраполируют на заданные параметры.

В качестве характерного показателя старения для резин и резиновых изделий при хранении в деформированном состоянии принимают:

- относительную остаточную деформацию сжатия по ГОСТ 9.029-74;
- релаксацию напряжения по ГОСТ 9982-76;
- условно-равновесный модуль по ГОСТ 11053-75 (при термическом старении по ГОСТ 9.713-86) [47].

Для рассматриваемых прокладок наиболее подходящим показателем старения является условно-равновесный модуль  $G_{\infty}$ , определяемый по ГОСТ 11053-75 для модельных образцов и натуральных изделий, при термическом старении по ГОСТ 9.713-86. Целью метода является определение значений условно-равновесного модуля при ускоренных старениях и прогнозирование его величин для длительной эксплуатации. Лабораторные испытания на старение всегда проводятся ускоренно, путем интенсификации одного из параметров, в данном случае внешней температуры.

**Современные представления о механизме термического старения.** Как уже отмечалось, старение резин или утомление, т.е. длительное разрушение под нагрузкой, представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных механохимических превращений, разделение которых просто невозможно в силу общности происходящих процессов. Поэтому многие авторы в понятие старение вкладывают все механические, электрические и химические явления, которые приводят к необратимому изменению свойств резины. При этом старение всегда характеризуется ухудшением эксплуатационных качеств изделия, потерей их работоспособности.

Протекающие в объеме резины химические реакции приводят к изменению структуры материала, к изменению микро- и макрохарактеристик и, в основном, могут быть двух типов.

Первый тип реакций называют структурированием; в этом случае в результате появления новых поперечных связей происходит образование новой молекулярной сетки. Реакции структурирования приводят к увеличению твердости, жесткости образца, увеличению модуля упругости, появлению остаточных деформаций при сжатии.

Второй тип реакций называют деструкцией и связывают с разрушением молекулярной сетки в результате разрыва основной цепи и разрыва поперечных связей. Реакции деструкции приводят к уменьшению модуля упругости.

Структурирование и деструкция развиваются в резиновом массиве одновременно; для большинства резин, эксплуатируемых в общем машиностроении, преобладающими являются реакции структурирования. Наиболее чувствительными к этим реакциям являются модуль упругости и коэффициент диссипации; именно эти характеристики и выбирают в качестве показателей, характеризующих нестабильность массивных резиновых изделий в процессе длительного хранения или эксплуатации.

Следует подчеркнуть, что реакции структурирования и деструкции в дальнейшем старения, вызываются не только напряженным состоянием; такие немеханические факторы как температура, электрические разряды, ультразвуковые волны, кислород, озон, масло и щелочи, излучение большой энергии и т.д., существенно влияют на структуру резины и могут привести к разрушению без механического воздействия.

В области физикохимии резин существует два взгляда на старение. Первое из них связано с исследованиями А.В. Тобольского, Г.М. Бартенева и других авторов [4–8] и предполагает следующее: в резинах, имеющих энтропийную природу высокоэластичности, механическая активация химических реакций практически невозможна.

Второй взгляд связан с исследованиями А.С. Кузьминского и других авторов работ [9–12] и развивает представления о влиянии механических напряжений на кинетику химических, термических и термоокислительных процессов, протекающих в резинах при старении. Эта более распространенная точка зрения подтверждается и многочисленными исследованиями [44] для массивных резиновых и резинометаллических изделий.

Сущность этих исследований сводится к следующему: процесс старения резиновых изделий происходит как вследствие термических, так и термоокислительных реакций. Для пленок и изделий малой толщины более характерными является реакции окисления, т.к. при умеренных температурах скорость диффузии кислорода в образце сопоставима со скоростью его взаимодействия с материалом. Для массивных резиновых изделий при повышенных температурах скорость диффузии кислорода на поверхности будет намного больше, чем внутри

образца; поэтому в массиве изделия будут преобладать термические реакции.

Механизм термоокисления резин и влияние основных ингредиентов на процесс окисления достаточно подробно рассмотрены в литературе [4–16, 19, 30, 22–24].

Здесь же остановимся на влиянии напряжений на механизм химических реакций в резине, находящейся под нагрузкой. В физикохимии эластомеров влияние напряжений на реакции структурирования и деструкции рассматривают в рамках термофлуктуационной теории прочности [17, 18]. Согласно этой теории напряжения снижают величину энергии активации распада химических связей в полимерной цепи, а долговечность в этом случае можно описать кинетическим уравнением С.Н. Журкова

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – время до разрушения образца;  $\tau_0$  – константа; обычно собственная частота колебаний атомов в полимерной цепи,  $\tau_0 = 10^{12}$ - $10^{13}$ ;  $\gamma$  – коэффициент перенапряжения на химических связях;  $\sigma$  – приложенное напряжение;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $U_0$  – энергия активации распада химических связей в полимерной цепи;  $T$  – абсолютная температура.

Согласно этому уравнению разрушение резины обуславливается разрывами межатомных перенапряженных связей тепловыми флуктуациями, что подтверждается с помощью прямых экспериментальных исследований методом ИК-спектроскопии [44]. При этом деформация под действием внешних напряжений на первом этапе совершается за счет конформационных перестроек, а затем за счет увеличения валентных углов и межатомных расстояний, что приводит, в конечном итоге, к уменьшению энергии химических связей за счет роста внутренней энергии всей системы [17, 24]. Как видно, изменение кинетики химических реакций под действием напряжений носит энтропийный характер.

Поэтому весьма перспективным является привлечение термодинамической теории высокоэластичности резины. В этом случае под действием нагрузки при независимых переменных (температура  $T$  и давление  $P$ ) изменение свободной энергии  $\Delta W$  по Гиббсу можно представить в виде

$$\Delta W = \Delta H - T\Delta S + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \Delta x_i, \quad (2)$$

где  $\Delta H$ ,  $\Delta S$  – изменение соответственно энтальпии и энтропии образования системы;  $\varepsilon_i$  – обобщенная сила, сопряженная с  $i$ -ой обобщенной координатой  $x_i$ ;  $n$  – число обобщенных сил.

Для одноосного растяжения – сжатия

$$\Delta W = \Delta H - T\Delta S + A, \quad (3)$$

где  $A$  – работа деформирования образца.

Как видно из уравнения (3) работа растяжения-сжатия может оказывать заметное влияние на скорость химических процессов под действием напряжений; при большом влиянии работы будут иметь место акты непосредственного разрыва химических связей и константа скорости будет возрастать с ростом напряжения или деформации.

**Старение резин под действием агрессивных сред.** Резиновые прокладки работают в постоянном контакте с физически активной средой: химически активные жидкости, углеводороды, (например: осевое масло), кислотные дожди и т.д. Обычно совокупность физико-химических изменений в резине под действием агрессивной среды определяют как хемодеструкцию. Реакция хемодеструкции может идти в кинетическом режиме, если скорость диффузии реагента в объеме резины значительно превышает скорость химической реакции, или в диффузионном режиме, если скорость реакции превышает скорость диффузии реагента; в последнем случае деструкция происходит преимущественно в поверхностном слое. На практике процесс обычно происходит в смешанном диффузионно-кинетическом режиме.

В настоящей работе исследования по действию агрессивной среды на прокладки не проводились. Поэтому ниже ограничимся обобщениями, весьма важными для дальнейшей работы по определению отказов прокладок; более подробные сведения по этой проблеме в литературе [27–44].

1. Стойкость резин к действию жидких углеводородных сред существенно зависит от типа каучука. Одно из основных отличий старения резин в таких средах является их набухание, следствием которого является увеличение объема, массы и изменения всех физико-механических характеристик резины. Процесс набухания весьма сложен и является результатом диффузионной сорбции резиной жидкой углеводородной среды.

2. Старение резины в агрессивной среде обычно рассматривают как механически активированный процесс; возникающие при набухании резин механические напряжения вызывают в них протекание различных химических процессов.

3. При одновременном действии на резину внешних механических напряжений и активной внешней среды скорость химических реакций возрастает; в ряде случаев может произойти механическое разрушение образца.

**Старение резин под действием ультрафиолетового облучения и озона.** При ультрафиолетовом облучении химические реакции протекают в основном на поверхности резины и приводят, как правило, к деструкции материала. При действии внешних напряжений и солнечного света на поверхности резины появляются тонкие острые трещины, которые в дальнейшем могут служить концентраторами напряжений. К таким же трещинам приводит и воздействие озона.

Как и в предыдущем случае, специальных исследований по этому вопросу не проводилось. Связано это, прежде всего, с тем фактом, что в реальных условиях эксплуатации резиновые прокладки защищены металлическими частями рельсового пути, и лишь незначительная часть их подвержена действию активной внешней среды. Поэтому ниже ограничимся общими замечаниями по растрескиванию резин под действием озона. Более подробно в литературе [27–44].

1. Уже при нормальной концентрации озона в атмосфере (несколько частей на  $10^7$  частей воздуха) на свободной поверхности резины, находящейся в напряженном состоянии, появляются тонкие острые трещины; в атмосфере крупных городов концентрация озона более высокая и этот факт следует учитывать при назначении срока службы резиновых изделий.

2. Озонные трещины обычно узкие, острые и развиваются в направлении, перпендикулярном к направлению действия приложенного напряжения; обычно они развиваются при растягивающих напряжениях, при деформациях сжатия озонные трещины, как правило, не растут.

3. На скорость роста озонных трещин влияет тип каучука, напряженно-деформированное состояние образца, концентрация озона и температура внешней среды. На практике озонное растрескивание характеризуют следующими показателями: временем до появления видимых трещин и их числом, степенью растрескивания, глубиной трещин, временем до разрыва образца в среде озона при фиксированной

нагрузке, скоростью разрастания и т.д.

4. В тонких образцах под действием озона релаксационные процессы ускоряются: в массивных резиновых изделиях озон оказывает влияние в основном в поверхностном слое.

5. Аналитическая оценка воздействия озона на разрушение резины сводится к решению двух задач.

Первая задача предусматривает определение долговечности резины в виде, как правило, стандартного образца, помещенного в напряженном состоянии в среду озона. Для определения долговечности используют уравнение вида [31]

$$\tau(\sigma, c) = \left[ \left( \frac{B_1}{1 + c^{m/\alpha}} + B_2 \right) \sigma^{-k} \right] \beta(\sigma), \quad (4)$$

где  $\beta(\sigma)$  – некоторая функция напряжения;  $c$  – концентрация озона;  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $m$ ,  $\alpha$ ,  $k$  – постоянные, определяемые опытным путем.

Вторая задача сводится к определению скорости роста единичного надреза в стандартном образце, поверхность которого покрыта защитной силиконовой смазкой. В этом случае действие озона распространяется только на конец трещины. Экспериментально [39] было отмечено, что скорость роста трещины зависит от величины приложенного напряжения, прямо пропорциональна концентрации озона и подчиняется уравнению

$$-\left( \frac{\partial \xi}{\partial A} \right) = KC_0 W, \quad (5)$$

где  $-\left( \frac{\partial \xi}{\partial A} \right) = T_0$  – поверхностная энергия разрушения резины;  $C_0$  – относительная длина надреза;  $W$  – плотность критической энергии разрушения;  $K$  – коэффициент, определяемый опытным путем.

При обычном разрушении резинового образца с надрезом величина  $T_0 = 10 \div 10^3$  Дж/м<sup>2</sup>, а при действии озона  $T_0 = 10^{-1}$  Дж/м<sup>2</sup>. Это свидетельствует о том, что в первом случае для роста трещин необходимо разрушить химические связи и для этого следует приложить значительную энергию; под действием озона эти связи разрушаются в результате химических реакций на конце трещины и для ее роста большие напряжения не нужны.

**Обобщения для дальнейших исследований.** Как уже отмечалось, в современной физикохимии понятие «старение резины в напря-

женном состоянии» сводится к комплексу механохимических процессов: механической и химической релаксации, утомлению, разрушению под действием напряжений и физически активной внешней среды и т.д. Поэтому строгое обобщение всех этих процессов приводит к сложным многофакторным испытаниям, результаты которых довольно сложно объяснить, и к громоздким математическим уравнениям с большим числом неизвестных. Вот почему в инженерной практике при прогнозировании старения резин и резиновых изделий применяют в большинстве случаев полуэмпирические методы; при этом параметры имеют ясный физический смысл, механизм старения представляют в виде феноменологической модели, а математический аппарат не является громоздким. Однако такой подход является не всегда корректным; причиной неточности прогнозирования старения (изменения свойств во времени) может быть не только несоответствие режима старения стандартных образцов условиям эксплуатации реальных резиновых изделий, но и изменение самого механизма старения.

Так, например, резиновые прокладки рельсового пути эксплуатируются при различных климатических условиях и различных внешних температурах, моделирование которых весьма затруднительно. Поэтому в таких случаях, т.е. при переменных условиях эксплуатации, следует использовать методы аддитивного суммирования изменения свойств материала, а в качестве факторов, влияющих на эксплуатационные свойства, выбирать один или два наиболее важных. В таком случае можно сравнительно просто провести факторный анализ с последующим составлением математического описания кинетики изменения физико-механических характеристик и экстраполяции их на условия реальных режимов эксплуатации.

Если для рассматриваемых прокладок в качестве основного фактора выбрать температуру внешней среды, что наиболее соответствует реальным условиям, то при ускоренных испытаниях на климатическое старение следует использовать понятие «эквивалентная температура» по ГОСТ 9.713-86 или по ГОСТ 9.707-81, при этом константа скорости изменения показателя старения будет соответствовать своему среднему значению при изменяющихся температурах. Есть еще два весьма важных вопроса, касающихся исследования кинетики процессов старения.

Первый из них касается выбора объекта исследования. Государственные стандарты предусматривают использование стандартных об-

разцов; в большинстве случаев это тонкие полоски резины, так называемые двухсторонние лопатки. Полученные при испытаниях таких образцов результаты больше относятся к свойствам резины и их перенос на массивные резиновые изделия не всегда возможен. Поэтому для рассматриваемого случая более целесообразно использовать резино-металлические блоки типа БРМ 101, хорошо зарекомендовавшие себя при комплексных исследованиях процессов изменения свойств резины при старении [44], а в качестве контрольных исследований на климатическое старение использовать натурные образцы, т.е. резиновые прокладки.

Второй вопрос относится к выбору характерного показателя свойств резины, изменяющегося в процессе старения. Основным видом деформации резиновых прокладок, является статическое сжатие и эпизодическая динамическая нагрузка; предполагаемый срок службы 4–6 лет. Таким образом, прогнозируемая долговечность прокладки будет обеспечена, если в течение заданного времени ее основные параметры не выйдут за граничные пределы, обусловленные условиями эксплуатации. Основным механическим параметром прокладки является жесткость на сжатие, и она не должна существенно отличаться от номинальной, определяемой из расчета динамической системы.

Таким образом, для рассматриваемых резиновых прокладок рельсового пути при климатических испытаниях на старение необходимо:

1. В качестве основного фактора использовать температуру внешней среды и исследования проводить по ГОСТ 9.713–86 или при исследовательской работе по ГОСТ 9.707–81.

2. В качестве модельных образцов использовать резино-металлические элементы типа БРМ 101, изготовленные из рекомендуемых резин; в качестве контрольных испытаний использовать натурные резиновые прокладки.

3. В качестве характерного показателя свойств резины для модельных образцов использовать: условно-равновесный модуль сдвига  $G_{\infty}$  (или  $E_{\infty}$ ), динамический модуль  $G_d$  и коэффициент диссипации  $\psi$ ; для прокладок – статическую жесткость на сжатие  $C_{\infty}$ , определяемую при величине относительной деформации, соответствующей эксплуатационной.

**Прогнозирование механического поведения резин при длительном старении.** Такое прогнозирование будем проводить по методу ускоренных испытаний на климатическое старение согласно

ГОСТ 9.707-81 [48]. Этот стандарт распространяется на резиновые детали в напряженном состоянии (сжатие радиальное до 25 %, осевое до 45 %). Сущность метода заключается в проведении ускоренных испытаний модельных образцов на стойкость к старению при воздействии внешнего температурного поля, установлении характера кинетической зависимости изменения показателя при старении, построении кривой прогноза и определении значения показателя после заданной продолжительности воздействия температур. Методы стандарта применяют обычно для исследовательских испытаний. Результаты испытаний могут быть включены в стандарты и технические условия на детали (в данном случае на прокладки) и использованы для определения и прогнозирования изменения физико-механических показателей резин при длительном старении.

Определение и прогнозирование изменений будем проводить по одному характерному показателю; для модельных образцов по условно-равновесному модулю сдвига  $G_{\infty}$ ; для натуральных прокладок по статической жесткости  $C_{\infty}$ . Помимо этого для модельных образцов будут определяться в процессе испытаний: мгновенный модуль сдвига  $G_0$ , динамический модуль сдвига  $G_d$  и коэффициент диссипации энергии  $\psi$  по методике [44].

Фактором климатического старения является температура: положительная, отрицательная, сезонные и суточные циклические ее изменения.

Согласно стандарту должны быть соблюдены следующие условия.

**1. Образцы.** Форма и размеры образцов для испытаний, способ и режимы их изготовления должны соответствовать требованиям, установленным в стандартах на метод определения показателя. Условно-равновесный модуль сдвига в качестве характерного показателя резины выбран из тех соображений, что коэффициент Пуассона резины близок к 0,5 и поэтому любая деформация является деформацией сдвига. Стандартные образцы позволяют определить модуль Юнга при растяжении и вычислить модуль сдвига по результатам этих испытаний довольно сложно, т.к. нужно учитывать фактор формы образца. К тому же распределение напряжений в тонкой полоске и реальной прокладке существенно отличаются. Поэтому в качестве модельных образцов выбраны резинометаллические элементы типа БРМ 101 (размеры по резине 35×60×100 мм), выполненные из одной партии резины

и отобранные по статической жесткости на сдвиг. Отклонение от средней жесткости не более 5 %; количество пар образцов, испытываемых при одной температуре согласно стандарту не менее трех; методика испытаний изложена в [46].

**2. Выбор материала.** Ранее был проведен цикл физико-механических испытаний различных резин для определения наиболее подходящего материала для резиновых прокладок рельсового пути. Результаты этих испытаний приведены в таблице 1; там же приведены и физико-механические характеристики резин, используемых для изготовления серийных прокладок. Из четырех экспериментальных резин была выбрана резина № 1 (на основе СКИ-3+ +СКМС-30АРКМ-15 по 50 масс. частей; технический углерод – 65 масс. частей; окись цинка – 5 масс. частей). Из одной партии резины изготавливались опытные образцы прокладок типа ПН и модельные образцы типа БРМ 101.

**3. Выбор испытательного оборудования.** Согласно стандарту предельная допускаемая погрешность термокамеры не должна превышать  $\pm 3$  °С. Испытания проводились в термокамерах типа СНОЛ-3,5 с предельной допускаемой погрешностью  $\pm 2-3$  °С и принудительной вентиляцией.

**4. Выбор температуры испытания.** Согласно стандарту термическое старение проводят при температурах  $T_1 < T_2 < T_3 < \dots T_n$ , где  $n \geq 4$ ; интервал между температурами не должен быть менее 10 °С (10 К); минимальная температура испытаний  $T_1$  должна быть равна или выше абсолютного максимума температуры эксплуатации; максимальная температура испытаний  $T_{\max}$  должна быть на 10 °С ниже температуры, при которой в материале образца начинаются фазовые, структурные или химические превращения. Для исследуемых прокладок максимум температуры летом достигает примерно 55÷70 °С, поэтому  $T_1 = 60$  °С; максимальная температура, при которой возможны фазовые превращения находится в пределах 100÷110 °С, поэтому выбираем  $T_{\max} = 100$  °С.

Таким образом, выбранный диапазон температур составляет 60, 70, 80, 100 °С.

**5. Продолжительность испытаний** при каждой температуре не должна быть меньше, чем требуется для получения существенных изменений характерного показателя. В данном случае для температур 60 °С продолжительность составляла 200 суток; для температуры 70 °С – 180 суток, для температуры 80 °С – 150 суток и для температуры 100 °С – 100 суток. Эти продолжительности выбраны с учетом

опыта исследований с аналогичными резинами [44].

Таблица 1 – Результаты исследований физико-механических характеристик опытной партии резиновых прокладок рельсового пути, одиночных и двойных перекрестных стрелочных переводов (Изготовитель ОАО «Днепрошина»)

№ п/п	Наименование показателей	Серийные резиновые прокладки ДСТУ 2805-94	Резиновые прокладки по ТУ 38-105-683-87	Экспериментальные образцы опытных прокладок конструкции НКТЬ ЦП УЗ			
				1	2	3	4
1.	Условная прочность при растяжении, МПа	7,3	17,2	18,2	14,5	17,5	14,3
2.	Относительное удлинение при разрыве, %	220	335	340	300	485	365
3.	Относительная остаточная деформация после разрыва, %	6	12	6	12	12	12
4.	Твердость, ед. по Шору А	60	75	67	75	60	71
5.	Температурный предел хрупкости, °С	-30	-55	-58	-52	-54	-56
6.	Истираемость, см <sup>3</sup> /кВт·ч	426	256	197	131	50	38
7.	Коэффициент теплового старения по относительному удлинению при 70 °С, 144 ч, %	0,55	0,73	0,68	0,6	0,67	0,79
8.	Удельное объемное сопротивление, Ом/м	2,6·10 <sup>11</sup>	9,1·10 <sup>11</sup>	9,9·10 <sup>11</sup>	9,8·10 <sup>11</sup>	9,9·10 <sup>11</sup>	11·10 <sup>11</sup>
9.	Изменение массы образца после воздействия осевого масла при 23 °С в течении 24 часов, %	6,1	6,8	7,0	7,0	14,1	20,5
10.	Изменение относительного удлинения после старения в воздухе при 100 °С, 24 ч, %	-8,3	-27,3	-46,1	-11,3	-49,9	-55,3
11.	Относительная остаточная деформация сжатия при 30 % сжатии, 70 °С, 24 ч	39,8	32,1	20,6	30,1	36,5	19,2
12.	Параметры вулканизации стандартных образцов	151 °С 10 мин	143 °С 15 мин	151 °С 20 мин	151 °С 20 мин	151 °С 20 мин	151 °С 15 мин
13.	Вулканизационная усадка, %	2	1,5	1,9	1,9	1,8	1,9
14.	Усталостная выносливость при многократном растяжении, E = 150 %, циклов до разрушения	520	1890	21460	21840	14985	26300

6. В процессе испытаний согласно стандарту определение физико-механических испытаний образцов при каждой температуре проводилось периодически не менее 7 раз.

7. **Проведение испытаний.** Образцы в напряженном состоянии (сжатие образцов осуществлялось попарно согласно методике [44] специальными струбцинами; относительная деформация сжатия составляла 30 %, т.е. соответствовала максимальной эксплуатационной для реальных прокладок) помещались в термокамеру и периодически, примерно через 12 суток, после охлаждения до  $T = 20 \pm 5$  °С подвергались испытаниям.

8. **Обработка результатов** проводилась одним из методов, изложенных в [48]. Выбор метода определялся характером хода полученных кривых термического старения; они являются монотонными и стремятся к одному предельному значению, не зависящему от температуры.

Аналитическая обработка данных, полученных в результате длительного старения, проведенная согласно [48] показала, что изменение характерного показателя  $G_\infty$  во всех случаях происходило по экспоненциальному закону до некоторого предельного значения  $G_\infty^{00}$ , не зависящего от температуры испытаний. В пределах погрешности эксперимента для описания функциональных зависимостей  $G_\infty \sim t$  можно принять экспоненциальный закон вида

$$\frac{dG_\infty}{dt} = k_i (G_\infty^{00} - G_\infty^0) \quad (6)$$

или

$$G_\infty(t) = \bar{G}_\infty^{00} - (\bar{G}_\infty^{00} - \bar{G}_\infty^0) \exp(k_i t), \quad (7)$$

где значение модулей сдвига измеряются в МПа,  $t$  в сутках, а значения начального и предельного модулей сдвига соответственно равны:  $\bar{G}_\infty^0 = 17,4$  МПа,  $\bar{G}_\infty^{00} = 29,2$  МПа.

В этом случае значения скорости процесса старения  $k_i$  в зависимости от температуры старения будут следующие:

$T, \text{ }^\circ\text{C}$	60	70	80	100
$k_{(\text{сутки})}^{-1}$	0,112	0,140	0,181	0,223

В дальнейшем определяем по номограммам согласно методике [48] эквивалентную температуру  $T_3 = 24$  °С и строим график  $\ln k \sim 1/T$

(рисунок 1). Экстраполируя график зависимости  $\ln k \sim 1/T$  на эквивалентную температуру  $T_3$  определяем константу скорости процесса термического старения  $k_3$ , соответствующую  $T_3$  (рис. 1):  $k_3=8,398 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ ;

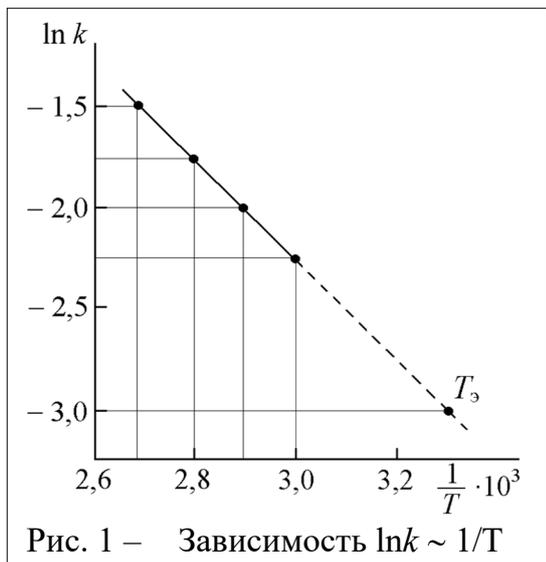


Рис. 1 – Зависимость  $\ln k \sim 1/T$

$\ln k_3 = -3,0$ . Подставляя полученные значения  $k_3$  и  $\bar{G}_\infty^{00}$  в уравнение [7], вычисляем значения условно-равновесного модуля  $G_\infty$  в зависимости от заданных значений  $t_i$ .

Кривая прогнозирования изменения во времени характерного показателя  $G_\infty$  подчиняется уравнению

$$G_\infty(t) = 29,2 - 11,8 \exp(-8,398 \cdot 10^{-3} t) \quad (8)$$

и представлена в виде графика на рис. 2.

Как отмечалось выше, наряду с  $G_\infty$  при частотах и амплитудах деформирования на сдвиг образцов соответственно при  $\omega = 3 \div 20$  Гц и  $A = 10$  мм (относительная деформация

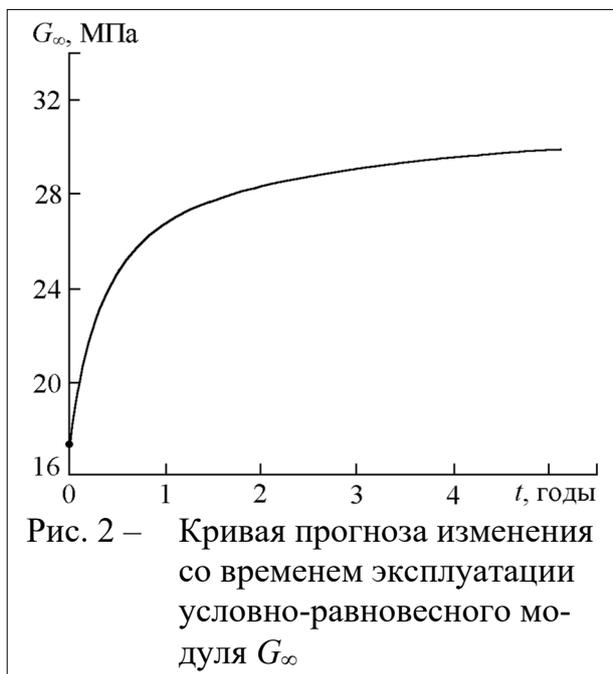


Рис. 2 – Кривая прогноза изменения со временем эксплуатации условно-равновесного модуля  $G_\infty$

30 %) определялись динамический модуль сдвига  $G_d$  и коэффициент поглощения энергии  $\psi$  (по динамической петле гистерезиса согласно методике [44]); на рис. 3 и рис. 4 показаны эти зависимости для эквивалентной температуры  $T_3 = 24$  °С.

Кривая изменения со временем эксплуатации динамического модуля сдвига  $G_d$  подчиняется уравнению (7) с аналогичными константами скорости. Несколько иначе ведет себя коэффициент дис-

сипации энергии; со временем эксплуатации его величина уменьшается примерно в шесть раз, что свидетельствует о существенном изменении релаксационных свойств и, следовательно, об уменьшении способности резины поглощать энергию внешних механических и температурных полей. Зависимость  $\psi(t)$  подчиняется уравнению

$$\psi(t) = \psi_0 - k_\psi t, \quad (9)$$

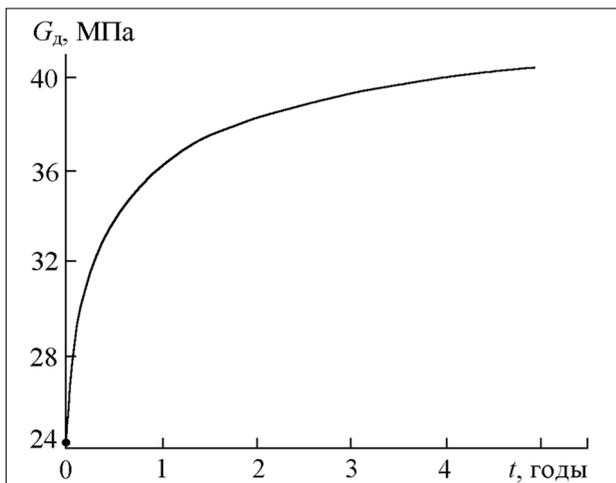


Рис. 3 – Кривая прогноза изменения со временем эксплуатации динамического модуля сдвига  $G_d$

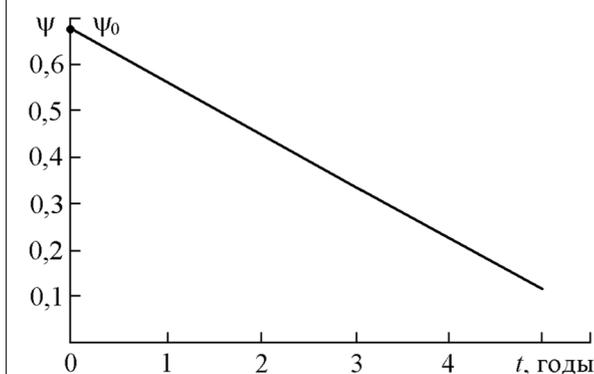


Рис. 4 – График прогноза изменения со временем коэффициента диссипации энергии  $\psi$

где  $\psi_0$  – начальное значение коэффициента диссипации энергии;  $k_\psi$  – константа скорости; для рассматриваемого случая  $\psi_0 = 0,68$ ;  $k_\psi = 1,28 \cdot 10^{-5}$  час<sup>-1</sup>.

### Обсуждение результатов эксперимента.

1. Наблюдаемые изменения модуля сдвига связаны с процессами структурирования; уменьшение со временем коэффициента диссипации можно объяснить преобладающим уменьшением внутренней вязкости вследствие старения материала.

2. Как уже отмечалось выше, а также в [44], напряженное состояние образцов несколько замедляет процесс старения, что связано с наличием релаксационных процессов в материале. Тем не менее, для соблюдения условий эксплуатации образцы испытывались в напряженном состоянии. Из кривых про-

гноза (рис. 2 – рис. 4) следует, что через 5 лет старения образцов в напряженном состоянии при эквивалентной температуре  $T_s = 24^\circ\text{C}$  характерный показатель  $G_\infty$  увеличится примерно на 70 %, а коэффициент диссипации энергии уменьшится в шесть раз. Такие изменения характерны для наполненных резин и не противоречат практике. Так, для прокладок типа ПН (предназначенных для шпал типа Б), изготовленных из резин на основе СКИ+СКМС с наполнением техническим углеродом 65 масс.ч. изменения основных физико-механических характеристик резины после 18 месяцев эксплуатации были следующими: жесткость на сжатие возросла на 63 %, а коэффициент диссипации энергии уменьшился на 210 %; данные получены для трех прокладок при испытании на сжатие при 30 % относительной деформации.

3. Метод ускоренных испытаний резин на климатическое старение по ГОСТ 9.707–81 требует длительных экспериментальных иссле-

дований и связан с довольно громоздкими работами по обработке полученных результатов; тем не менее, данные по изменению со временем основных показателей условно-равновесного модуля сдвига и коэффициента диссипации энергии в лабораторных условиях не могут быть получены другими адекватными методами. Их ценность, особенно если они в целом совпадают с данными, полученными в реальных условиях эксплуатации, заключается, прежде всего, в том, что функциональные зависимости  $G(t)$  и  $\psi(t)$  могут быть непосредственно введены в общее уравнение долговечности [3]. При этом наиболее предпочтительными являются массивные резиновые модельные образцы (вместо стандартных двухсторонних лопаток, работающих на растяжение), испытываемые при деформациях сдвига. В этом случае можно без дополнительных расчетов получить условно-равновесный модуль резины, так как при малых деформациях материал испытывает деформации, близкие к чистому сдвигу.

**Прогнозирование долговечности резиновых прокладок с учетом неустойчивости их механических характеристик.** Длительное разрушение резиновых прокладок характеризуется следующими особенностями:

- четко выраженным релаксационным характером деформации, который приводит к неоднозначной, зависящей от амплитуды и скорости деформирования, связи между напряжением и деформацией;
- существенным рассеиванием механической энергии в объеме резины, что приводит к диссипативному разогреву и повышению активирования химических реакций;
- стохастическим изменением направления механического воздействия на прокладку, в результате которого в материале происходят постоянные рекомбинации углерод – углеродных связей, что приводит, помимо прочих других причин, к зависимости  $G$  и  $\psi$  от амплитуды деформации;
- изменением физико-механических характеристик поверхностных слоев прокладки в результате действия внешней активной среды;
- неустойчивостью физико-механических характеристик материала в процессе разрушения.

Эти особенности и были положены в основу физических и расчетных моделей для определения долговечности резиновых прокладок.

**Феноменологическая модель.** В рамках феноменологического подхода процесс старения резины можно представить следующим образом: при длительном хранении или эксплуатации резиновых изделий

в нагруженном состоянии в обычной или агрессивной среде их физико-механические характеристики со временем изменяются. В основе этих изменений лежат особенности молекулярного строения резины, а также процессы структурирования и деструкции, протекающие в массиве изделий от их изготовления до отказа. Эти процессы развиваются в резине одновременно, а приобретаемые изделием свойства обычно определяются долей участия преобладающего процесса. Для большинства технических резин преобладающими являются процессы структурирования, что выражается в увеличении модуля сдвига и, следовательно, жесткостных свойств изделий; коэффициент диссипации энергии (характеризует поглощение энергии в единице объема материала) при этом уменьшается и это свидетельствует о потере резиной способности поглощать энергию внешних полей.

**Интегральная математическая модель на основе линейной теории Больцмана-Вольтерра.** По этому вопросу имеющаяся литература весьма ограничена. В разное время авторы работ [21, 25, 33, 36, 44, 50] с некоторыми вариациями изложили общий алгоритм учета изменений  $G(t)$  и  $\psi(t)$  для резин при циклических нагрузках. При этом были приняты следующие допущения:

1. Если изделие длительное время находится в режиме жесткого кинематического возбуждения по гармоническому закону

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_a \sin \omega t, \quad (10)$$

то статическая составляющая нагрузки  $\varepsilon_0$  образует инвариант (средняя по объему упругая потенциальная энергия тела  $U$ ), который ответствен за влияние напряжений на процесс старения; здесь  $\varepsilon_a$  – амплитудное значение деформации.

2. Температурное поле является определяющим в процессе старения резины.

С учетом этих допущений связь  $\sigma \sim \varepsilon$  для установившегося режима может быть описана (без учета старения) линейной теорией Больцмана-Вольтерра с ядром релаксации  $K(t - \tau)$  в виде

$$\sigma_{ij} = G^* (2\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} S), \quad (11)$$

где  $S$  – функция гидростатического давления  $\left( \frac{\sigma_{ij}}{3} = G^* S \right)$ ;  $\delta_{ij}$  – символ

Кroneкера.

Оператор сдвига  $G^*$  определяется как

$$G^* \varepsilon(t) = G_0 \left[ \varepsilon(t) - \int_0^t K(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right], \quad (12)$$

где  $G_0$  – мгновенное значение модуля сдвига.

Для учета процессов старения в уравнении (11) следует заменить оператор сдвига и ввести специальную функцию  $f(t)$ , учитывающую изменение модуля и коэффициента поглощения энергии от величины потенциальной энергии  $U$ , температуры  $T$  и времени  $t$ , т.е.

$$f(t) = f(U, T, t). \quad (13)$$

В этом случае

$$\sigma_{ij} = G^{**} (2\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} S), \quad (14)$$

а оператор сдвига  $G^{**}$  (с учетом эффектов старения) определится как

$$G^{**} \varepsilon(t) = G_0 \left[ \varepsilon(t) - f(t) \int_0^t K(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right]. \quad (15)$$

При этом должно выполняться условие  $f(U, T, t=0) = 1$ .

Для упрощения решения уравнения (14) обычно вводят разделение истинного времени  $t$  на две составляющие: первая  $\hat{t}$  – короткий период динамического нагружения, в течение которого эффектами старения можно пренебречь; вторая  $t^*$  – время старения, в течение которого материал изменяет свои механические свойства.

В этом случае при стационарном и однородном тепловом процессе уравнения (14) и (15) примут вид

$$\sigma_{ij}(\hat{t}, t^*) = G^{**} [2\varepsilon_{ij}(\hat{t}) + \delta_{ij} S(\hat{t}, t^*)]; \quad (16)$$

$$G^{**} \varepsilon(\hat{t}) = G_0 \left[ \varepsilon(\hat{t}) - f(t^*) \int_0^{\hat{t}} K(\hat{t}-\hat{\tau}) \varepsilon(\hat{\tau}) d\hat{\tau} \right]. \quad (17)$$

Если принять допущение о несжимаемости резины и о том, что характер напряженного состояния не влияет на процесс старения, то для случая одноосного сжатия, характерного для рассматриваемых прокладок, уравнение (17) с учетом  $\varepsilon(\hat{t}) = \varepsilon_a \sin \omega \hat{t}$  принимает вид

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(\hat{t}, t^*) &= 3G_0 \varepsilon_a \left[ \sin \omega \hat{t} - f(t^*) \int_0^{\hat{t}} K(z) \sin \omega(\hat{t}-z) dz \right] = \\ &= 3G_0 \varepsilon_a \left[ \sin \omega \hat{t} - f(t^*) A(\omega) \sin \omega \hat{t} + f(t^*) B(\omega) \cos \omega \hat{t} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$A(\omega) = \int_0^{\infty} K(z) \cos \omega z dz, \quad (19)$$

$$B(\omega) = \int_0^{\infty} K(z) \sin \omega z dz, \quad (20)$$

$$z = \hat{t} - \hat{\tau}.$$

Из (18) в [21, 42] были получены выражения для  $G(t)$  и  $\psi(t)$  в виде

$$G(t) = G_0 \sqrt{[1 - f(t^*)A(\omega)]^2 + [f(t^*)B(\omega)]^2}; \quad (21)$$

$$\psi(t) = 2\pi f(t^*)B(\omega). \quad (22)$$

Из выражений (13) и (22) можно получить функцию  $f(t^*)$  для коэффициента диссипации энергии

$$\psi(t^*) = \frac{\psi(t_i)}{\psi_0}, \quad (23)$$

где  $\psi(t_i)$  – значение коэффициента для времени  $t_i$ ;  $\psi_0$  – исходное значение при  $t^* = 0$ .

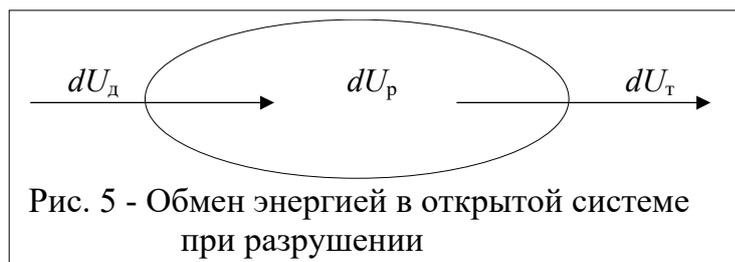
Изложенный алгоритм достаточно полно учитывает реологические характеристики резины и при наличии функции старения  $f(t^*)$ , определяемой, как правило, экспериментально, можно найти функции  $G(t)$  и  $\psi(t)$  и в дальнейшем использовать их для определения времени до отказа резиновых прокладок. Ценность этого алгоритма заключается именно в учете реологических свойств материала. Ниже излагается алгоритм определения срока службы прокладок до отказа, в котором используются функции  $G(t)$  и  $\psi(t)$ , полученные, в том числе и с помощью уравнений (21) и (22).

**Термодинамическая модель.** Как уже отмечалось [3] работа резиновых прокладок характеризуются следующими особенностями: постоянными деформациями сжатия от рельсового пути; циклическими деформациями сжатия; деформациями сдвига от угона и возврата рельсы; проскальзыванием прокладки по подошве рельсы; несимметричностью циклической нагрузки; стохастическим характером циклической нагрузки; влиянием климатических условий (сезонные изменения температуры); влиянием агрессивной внешней среды: солнечная радиация, озон и кислород воздуха, осевое масло, активные жидкости и т.д.

Учесть все эти особенности в одном алгоритме расчета можно

лишь используя интегральные модели. Поэтому автор использовал наиболее обобщенную термодинамическую модель, в которой сочетание механических и тепловых полей приводит к необратимым изменениям свойств резины, что выражается временными зависимостями  $G(t)$ ,  $\psi(t)$ , а время до отказа является функцией энергии, идущей непосредственно на изменение структуры резины, т.е. на ее разрушение. При этом приняты следующие допущения: энергия от диссипативного разогрева и энергия от немеханического воздействия учитываются в эволюционных уравнениях (7) и (9) и при определении коэффициента  $\eta_p$ , характеризующего часть энергии, идущую на разрушение резины [44].

Основанием для таких допущений является следующее: температурное поле от диссипативного разогрева нестационарно, температура незначительна и ее величина не превышает больше, чем на 3–5 °С температуру окружающей среды; энергию от внешнего температурного поля можно учитывать эквивалентной температурой  $T_0$  при определении функциональных зависимостей  $G(t)$ ,  $\psi(t)$ ; энергия от немеханических воздействий (озон, кислород, осевое масло и т.д.) влияет только на свободную поверхность прокладки и, хотя ее влияние на механизм разрушения значительно и проявляется в озонных трещинах и набухании резины (той части, которая не закрыта металлическим башмаком), на изменение механических характеристик эта энергия заметного влияния не оказывает.



В рамках термодинамического подхода рассмотрим прокладку как открытую систему (рис. 5), обменивающуюся энергией с окружающей средой; в реальных

условиях система обменивается также и веществом за счет масс переноса резины при истирании, однако этот эффект здесь не рассматривается.

Для такой системы баланс энергий за время  $dt$  можно представить в виде [44]

$$dU_d = dU_T + dU_p,$$

где  $U_d$  – энергия диссипации;  $dU_T$  – поток тепловой энергии в окружающую среду;  $dU_p$  – энергия, идущая на осуществление необратимых процессов внутри системы, эта энергия используется на изменение

структуры материала за счет процессов утомления (разрушения структуры) и старения, которые разделить практически невозможно, при этом для системы всегда  $dU_p > 0$ .

В этом случае согласно первому началу термодинамики и алгоритму [3, 44] получим

$$\dot{U} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} + \dot{\chi}, \quad (24)$$

где  $\dot{\chi}$  – энергия внешней среды, например, внешнего теплового поля.

С учетом уравнения баланса энергии перепишем уравнение (24) в виде

$$\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} + \dot{\chi} = \dot{U}_p + \dot{q}, \quad (25)$$

где  $\dot{q}$  – тепловой поток.

Тогда

$$\int_0^{t_p} \dot{U}_p dt = \int_0^{t_p} (\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} dt + \dot{\chi} - \dot{q}) dt, \quad (26)$$

где  $t_p$  – время до разрушения системы; при циклическом нагружении  $t_p = \frac{2\pi}{\omega} n^*$ ;  $n^*$  – число циклов до разрушения.

Если принять

$$\int_0^{t_p} \dot{U}_p dt = \Delta U_p^*, \quad (27)$$

где  $\Delta U_p^*$  – критическое значение энергии разрушения, то из уравнения (26) можно получить выражение для числа циклов  $n^*$  до разрушения системы в виде [3, 44]

$$n^* = \frac{\Delta U_p^*}{0,5 E_0 \varepsilon^2 \psi (1 - \eta_T) f(x, y)}, \quad (28)$$

где  $E_0$  – мгновенное значение модуля упругости;  $\varepsilon$  – относительная деформация;  $\Delta U_p^*$  – критическое (предельное для данного материала) значение плотности энергии, идущей непосредственно на разрушение резиновой прокладки;  $\eta_T$  – параметр, характеризующий ту часть диссипируемой энергии, которая расходуется на теплообразование, для рассматриваемых прокладок при малой температуре от диссипатив-

ного разогрева параметр  $\eta_T$  можно принять постоянным по объему резины и не зависящим от условий нагружения и температуры окружающей среды;  $\eta_p = 1 - \eta_T$ ,  $\eta_p$  – параметр, характеризующий часть энергии, идущей непосредственно на разрушение резинового массива, для исследуемой резины  $\eta_p = 0,69$  [44];  $f(x, y)$  – функция, характеризующая распределение полей напряжений и деформаций в прокладке [3].

С учетом этого для центральной области прокладки уравнение (28) принимает вид

$$n^* = \frac{\Delta U_p^*}{0,5E_0\varepsilon^2\psi\eta_p f(x, y)}, \quad (29)$$

или с учетом эффектов старения и зависимостей  $G(t)$  и  $\psi(t)$  для гармонического нагружения прокладки получим

$$n^* = \frac{\Delta U_p^*}{0,5\eta_p f(x, y)\varepsilon^2 E(t)\psi(t)}, \quad (30)$$

Перепишем эволюционные уравнения (7) и (9) для  $E_d(t)$  и  $\psi(t)$  в виде

$$E_d(t) = E_d^{00} - (E_d^{00} - E_d^0)\exp(-k_d t), \quad (31)$$

$$\psi(t) = \psi_0 - k_\psi t. \quad (32)$$

При найденных экспериментально параметрах этих уравнений с помощью уравнения (30) можно определить число циклов до разрушения прокладки  $n^*$  или при известном  $n^*$  определить критическую энергию разрушения.

В этом случае для  $\Delta U_p^*$  уравнение (30) можно представить в виде

$$\Delta U_p^* = \frac{\eta_p f(x, y)\varepsilon^2 E_d(n^*)}{2} \sum_{n=1}^{n^*} \psi(n^*), \quad (33)$$

или с учетом уравнения (32)

$$\Delta U_p^* = \frac{\eta_p f(x, y)\varepsilon^2 E_d(n^*)}{2} (\psi_0 n^* - k_\psi n^{*2}). \quad (34)$$

Это уравнение позволяет определить критическое значение энергии разрушения или предельное количество циклов динамического нагружения до отказа прокладки с учетом неустойчивости свойств ма-

териала во времени. При этом изменение упругих характеристик резины целесообразно учитывать значением мгновенного модуля упругости  $E_0$  (предельное значение для состарившегося материала), а диссипативные свойства уравнением (32).

**Пример расчета.** Рассмотрим прокладку типа ПН (размер рабочей поверхности  $600 \times 205$  мм, толщина  $h = 14$  мм), изготовленную из резины № 1 (табл. 1). В качестве критерия отказа примем следующее: прокладка будет не пригодной для дальнейшей эксплуатации, если ее динамическая жесткость при сжатии ( $\varepsilon = 0,15$ ) увеличится на 60–70%, а коэффициент диссипации энергии уменьшится до  $0,1 \div 0,12$ , по времени эксплуатации это соответствует примерно  $4,5 \div 5,0$  годам, за это время количество циклов динамического нагружения будет равно  $n^* = 3,0 \cdot 10^7$ .

Значения параметров входящих в уравнение (34) (для центральной части объема прокладки) будет:  $E_0 = 3G_0 = 128$  МПа;  $\varepsilon = 0,15$ ;  $\eta_p = 0,69$ ;  $k_\psi = 1,28 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1} = 0,36 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ ;  $f(x, y) = 1,08$  (определена в [3]);  $\psi = 0,68$ ;  $\Delta U_p^* = (17 \div 20) \cdot 10^{12} \text{ Дж/м}^3$  (определено по методике [44]).

Тогда

$$\Delta U_p^* = 0,5 \eta_p f(x, y) \varepsilon^2 E_0 (\psi_0 n^* - k_\psi n^{*2});$$

$$18,0 \cdot 10^{12} = 0,5 \cdot 0,69 \cdot 1,08 \cdot 0,15^2 \cdot 128 \cdot 10^6 (0,68 \cdot n^* - 0,36 \cdot 10^{-8} n^{*2}).$$

Решая это квадратическое уравнение, получим число циклов до отказа прокладки  $n^* = 2,93 \cdot 10^7$  циклов, что соответствует примерно пяти годам эксплуатации. В реальных условиях эксплуатации присутствует эффект истирания прокладки и ее долговечность будет несколько меньше.

Долговечность прокладки определена для центральной области; для краевых областей долговечность вследствие неоднородности распределения напряжений будет отличаться. Однако это отличие не будет играть существенной роли для прогнозирования срока службы прокладки в целом.

Уравнение (30) демонстрирует не только взаимосвязь механических и термодинамических параметров, но и показывает ту особо важную роль, которую играют в долговечности прокладки необратимые структурные изменения материала. При этом упругие механические свойства играют несколько меньшую роль, чем диссипативные: через

4–5 лет эксплуатации прокладки ее жесткость на сжатие увеличивается на 60-70 %, а ее диссипативные свойства уменьшается почти в шесть раз. Материал теряет способность развивать обратимые высокоэластические деформации, теряет способность поглощать энергию механического поля и в конечном итоге прокладка как демпфирующее звено динамической системы прекращает свое функционирование. Отсюда следуют весьма важные выводы:

- прокладки должны изготавливаться из резины, имеющей стабильные свойства во времени, т.е. в состав исходной матрицы материала должны входить ингредиенты, стабилизирующие механические свойства в процессе эксплуатации;
- конструктивно прокладки должны быть выполнены с максимально возможно большим объемом материала, так как поглощение энергий механического поля и немеханического воздействия является функцией геометрических размеров изделия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Говоруха В.В., Надутый В.П. Исследование деформации и прочности характеристик резиновых прокладок рельсовых промежуточных скреплений // Геотехническая механика. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. –Вып. 14. –С. 161–167.
2. Говоруха В.В. Физико-технические основы создания элементов рельсового транспорта шахт и карьеров. –Киев: Наукова думка, 1992. –200 с.
3. Говоруха В.В. Обобщенные нелинейные модели деформирования и разрушения и методы прогнозирования долговечности вязкоупругих элементов рельсового пути // Геотехническая механика. –Днепропетровск: Полиграфист, 2001. –Вып. 24. –С. 94-113.
4. Тобольский А.В. Свойства и структура полимеров. –М.: Химия, 1964. –186 с.
5. Бартенев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. –М.: Химия, 1964. – 387 с.
6. Бартенев Г.М. Взаимосвязь процессов вязкоупругости и разрушения некристаллических полимеров // Релаксационные явления в полимерах. –Л.: Химия, 1972. –С. 76–87.
7. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Курс физики полимеров. –Л.: Химия, 1976. –287 с.
8. Кавун С.М., Подколзина А.М., Тарасова З.Н. Метод исследования термической и термоокислительной деструкции вулканизатов при статическом и динамическом нагружении // Высокомолекуляр. соединения. Сер.А. –1972. –14, №9. –С. 2113–2115.
9. Кузьминский А.С., Седов В.В. Химические превращения эластомеров. –М.: Химия, 1986. –264 с.
10. Кузьминский А.С., Лежнев Н.Н., Зуев Ю.С. Окисление каучуков и резин. –М.: Госхимиздат, 1957. –320 с.
11. Эммануэль Н.М., Бучаченко А.М. Химическая физика старения и стабилизации полимеров. –М.: Наука, 1982. –359 с.
12. Зуев Ю.С., Дегтева Т.Г. Стойкость эластомеров в эксплуатационных условиях. –М.: Химия, 1986. –264 с.
13. Кузьминский А.С., Лежнев Н.Н., Зуев Ю.С. Окисление каучуков и резин. –М.: Госхимиздат, 1957. –379 с.
14. Кузьминский А.С., Никитина Т.С., Цейтлин Б.Л. О действии ионизирующих излучений на каучуки и резины // Каучук и резина. –1957. –№6. –С. 35–37.
15. Кузьминский А.С. Старение и стабилизации полимеров. –М.: Химия, 1966. –78 с.
16. Кузьминский А.С., Иванова Р.И., Гинзбург Л.В. О механической активации и деструкции при утомлении резин // Механоэмиссия и механохимия твердых тел. –Фрунзе: Чиши, 1974. –С. 136–142.

17. Регель В.Р., Слущкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. –М.: Наука, 1974. –650 с.
18. Регель В.Р., Слущкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел // УФН. –1972. -106, Вып. 2. -С. 193–228.
19. Резниковский М.М., Присс Л.С., Хромов М.К. Влияние состава резины на ее усталостные свойства // Коллоид. журн. –1958. -20, Вып. 3. -С. 368–375.
20. Хотимский М.Н. О влиянии предварительного теплового старения резин на их усталостные и гистерезисные свойства при гармоническом режиме нагружения // Каучук и резина. –1975. -№ 3. -С. 39–42.
21. Хричиков В.В., Юдина Г.Г., Любчанская Л.И., Кузьминский А.С. К вопросу о старении резин при постоянных деформациях // Исследование и производство транспортных конструкций. -Рига: Звайгзне, 1972. -С. 253–256.
22. Хромов М.К., Присс Л.С., Резниковский М.М. Дальнейшее изучение методических вопросов в области испытаний резин на усталость // Труды НИИШП. –М.: Химия, 1960. -С. 51–53.
23. Подколзина М.М., Петрова Л.В., Федорова Т.В. Особенности изменения структуры вулканизационных сеток в процессе теплового старения и утомления резин // Каучук и резина. –1976. -№ 2. -С. 16–18.
24. Соколовский А.А., Вайнштейн Э.Ф., Ухова В.М., Кузьминский А.С. Старение резин в напряженном состоянии // Производство резинотехнических и асбестотехнических изделий. –М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1988. -Вып. 10. –85 с.
25. Хричиков В.В. Упругие свойства резин с учетом старения при равномерном всестороннем сжатии // Вопросы динамики и прочности. –Вып. 28. -С. 115–116.
26. Петров А.И., Бетехтин В.И., Закревский В.А. Влияние гидростатического давления на долговечность полимеров // Механика полимеров. –1976. -№ 2. -С. 207–213.
27. Зуев Ю.С., Праведникова С.И., Кошельникова Г.В. Влияние наполнителей и мягчителей на сопротивление резин озонному растрескиванию при разных деформациях // Каучук и резина. -1961. -№ 11. -С. 15–21.
28. Зуев Ю.С., Бартенев Г.М., Киршенштейн Н.И. О долговечности и прочности каучукоподобных полимеров // Высокомолекуляр. Соединения. –1964. -№ 9. -С. 1629–1633.
29. Зуев Ю.С., Дорфман Т.И. О влиянии дефектов на долговечность резин // Каучук и резина. –1966. -№ 3. -С. 32–35.
30. Зуев Ю.С., Борщевская А.З. Методы испытаний напряженных резин в агрессивных средах // Резина – конструкционный материал современного машиностроения. -М.: Химия, 1967.-С. 224–228.
31. Зуев Ю.С., Гольберг И.И. О долговечности резин в широком интервале напряжений и концентраций агрессивной среды // Механика полимеров. –1968. -№ 6. -С. 753–758.
32. Зуев Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. -М.: Химия, 1972. -230 с.
33. Лавендел Э.Э., Хричиков В.В. Жесткость элементов конструкций с учетом предварительного старения в напряженном состоянии // Вопр. динамики и прочности. –1976. -Вып. 33. -С. 124–128.
34. Лазарева К.Н., Резниковский М.М. Некоторые особенности утомления резин при асимметричном цикле нагружения // Каучук и резина. –1971. -№ 6. -С. 25–27.
35. Лазарева К.Н., Хромов М.К. О влиянии кислорода окружающей среды на прочность резин и усталостную выносливость при разной интенсивности механического нагружения // Каучук и резина. –1973. -№ 3. -С. 48–50.
36. Масленников В.Г., Канцанс М.В., Ботвинник Г.О., Трескунова Ю.М. Определение относительного изменения условно-равновесного модуля резины в процессе теплового старения при нагружении // Каучук и резина. –1975. -№ 3. -С. 42–44.
37. Lake G.J., Lindley P.V. Ozone attack and fatigue life of rubber // Use rubber engineering. –London. -1967. –196 p.
38. Ангерт Л.Г., Маврина Р.Н., Кузьминский А.С. Исследование причин повышенной озоностойкости резин, содержащих воск и антиозонат // Каучук и резина. –1962. -№ 2. -С. 19–21.
39. Роузен Б. Разрушение твердых полимеров. –М.: Химия, 1971. -320 с.
40. Хромов М.К., Богомолова Н.А. Влияние утомления на внутреннее трение и теплообразование резин // Каучук и резина. –1976. -№ 5. -С. 36–38.
41. Хромов М.К., Лазарева К.Н. О влиянии кислорода воздуха на усталостную выносливость резин // Каучук и резина. –1977. -№ 5. -С. 36–38.

42. Потураев В.Н., Дырда В.И., Круш И.И. Прикладная механика резины. –Киев: Наук. думка, 1975. - 216 с.
43. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. –М.: Машиностроение, 1977. -216 с.
44. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. –Киев: Наукова думка, 1988. -232 с.
45. Дырда В.И., Чижик Е.Ф. Резиновые детали в машиностроении. –Днепропетровск: Полиграфист, 2000. –581 с.
46. Ляпунов В.Т., Лавендел Э.Э., Шляпочников С.А. Резиновые виброизоляторы. –Ленинград: Судостроение, 1988. –214 с.
47. ГОСТ 9.713–86. Метод прогнозирования изменения свойств при термическом старении; Введен с 01.01.1988 г. –М.: Издательство стандартов, 1987. – 8 с.
48. ГОСТ 9.707–81. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение; Введен с 01.01.1983 г. –М.: Издательство стандартов, 1982. –56 с.
49. ДСТУ 2805–94. Прокладки гумові для рейкової колії; Введено в дію від 31 жовтня 1994 р. – Київ: Держстандарт України, 1995. –19 с.
50. Дырда В.И. Об одном методе ускоренного старения резинотехнических изделий // Вопросы динамики и прочности. –1976. –Вып. 32. –С. 114–118.

УДК 621.175.845:678.025.4

А.Е. Коновалов, В.В. Немченко

## **РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ УКРАИНСКИХ И НЕМЕЦКИХ ОЧИСТИТЕЛЬНЫХ ШАРИКОВ ДЛЯ СИСТЕМ ШАРИКОВОЙ ОЧИСТКИ КОНДЕНСАТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

Розглядається одна з актуальних проблем підвищення коефіцієнту корисної дії парових турбін за рахунок очищення пористими гумовими кульками трубок турбінних конденсаторів. Система очищення має велику ефективність, екологічно безпечна і економічно доцільна.

Одним из путей повышения эффективности работы энергоблоков тепловых электростанций является внедрение различных мероприятий, позволяющих повысить коэффициент полезного действия паровых турбин. Среди них важное место занимает борьба с органическими и биологическими загрязнениями трубок турбинных конденсаторов. Такие загрязнения постепенно ухудшают условия теплопередачи, что в итоге приводит к вынужденным остановкам турбин и к потерям электроэнергии.

Из известных в настоящее время способов борьбы с загрязнениями трубок наименее трудоемким, высокоэффективным, экономичным и экологически безопасным является способ очистки пористыми резиновыми шариками. Непрерывно двигаясь в трубках под напором