

УДК 621.315.211.9

ОЦЕНКА СРОКА СЛУЖБЫ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ СИСТЕМ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ГОРНОШАХТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Леонов Андрей Петрович¹,
leonov_ap@tpu.ru

Солдатенко Татьяна Михайловна¹,
ruhtinatm@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена повышением требований к эксплуатационным свойствам гибких кабелей, применяемых в системах питания и управления горношахтного электрооборудования. Основным направлением, обеспечивающим улучшение свойств, является применение новых электроизоляционных материалов. На сегодняшний день шахтные кабели изготавливаются преимущественно с изоляцией из резины. Перспективным решением в плане совершенствования конструкций гибких шахтных кабелей является применение этиленпропиленовой резины, обладающей более высокой нагревостойкостью по сравнению с применяемыми резинами на основе хлоропренового и бутилкаучука. Повышение допустимой температуры нагрева токопроводящих жил позволит повысить передаваемую мощность, высокие значения тока термической устойчивости при коротком замыкании с обеспечением требуемой гибкости. Практическое применение кабелей нового типа в системах горношахтного электрооборудования невозможно без экспериментального подтверждения ресурсных характеристик. Отсутствие в технической литературе рекомендаций по проведению подобных испытаний определяет необходимость исследований, позволяющих прогнозировать срок службы гибких кабелей с учетом изменения физико-механических свойств этиленпропиленовой резины.

Цель: разработать методику и определить срок службы гибких кабельных изделий с изоляцией из этиленпропиленовой резины для систем питания и управления горношахтного электрооборудования.

Объект: гибкий шахтный кабель, изоляция, этиленпропиленовая резина, физико-механические свойства, энергия активации, срок службы.

Методы: экспериментальные методы оценки физико-механических свойств и теплостойкости полимерных материалов; математические методы решения нелинейных систем уравнений и статистический анализ результатов испытаний.

Результаты. Разработана методика определения срока службы кабелей с изоляцией из этиленпропиленовой резины, основанная на методе прогнозирования изменения физико-механических свойств с учетом энергии активации E_a процессов термической деструкции. Определен срок службы гибких шахтных кабелей с учетом температуры.

Ключевые слова:

Горношахтное электрооборудование, гибкие шахтные кабели, изоляция, этиленпропиленовая резина, тепловое старение, относительное удлинение при разрыве, энергия активации, срок службы.

Введение

Надежность эксплуатации горношахтного электрооборудования во многом определяется безаварийной работой кабельных систем питания и управления. В свою очередь надежность любого кабельного изделия главным образом зависит от электрической изоляции [1].

Электроснабжение оборудования в шахтах обеспечивается кабельными линиями силовых цепей от главной понижающей подстанции на поверхности, проложенных через ствол до центральной подземной подстанции, расположенной в околоствольном дворе, и далее до участковых подземных подстанций, размещенных непосредственно в забое. Работа электрических передвижных машин и механизмов от участковых подземных подстанций организована путем применения гибких кабельных линий. Электрический кабель в шахтах вследствие большой протяженности является наиболее уязвимым элементом электрооборудования, поэтому в обеспечении безопасности значительную роль играет соответствие кабеля условиям его эксплуатации. Конструкция кабеля в значительной степени определяет безотказную работу кабельной сети. Особенности эксплуатации электрических

шахтных кабелей определяют основные причины выхода из строя, к которым в большей степени относятся повреждения, полученные в результате обвала горных пород – порезы и порывы наружной оболочки, сжатие и раздавливание кабелей в целом. К другому виду повреждений относятся раздавливание передвижными механизмами и машинами, а также порубы ручным инструментом, связанные в основном с человеческим фактором при недостаточной видимости в шахтах. Еще одной немаловажной причиной отказов являются внутренние дефекты, полученные в процессе изготовления или возникающие в результате эксплуатации. Это проявляется в виде разрушения отдельных элементов конструкции кабелей и в дальнейшем приводит к снижению электрического сопротивления токопроводящих жил и изоляции [2].

В системах питания и управления горношахтного электрооборудования применяются кабельные изделия двух типов: стационарные и гибкие. Стационарные кабели питают выработки и горизонты и предназначены для подключения стационарного силового оборудования или шахтных трансформаторов. Такие изделия всегда имеют в своей конструкции броню из стальных лент или проволок, медные жилы и основ-

ную изоляцию из резины или ПВХ-пластиката. Кабели с броней из стальных лент применяются при отсутствии растягивающих нагрузок в процессе эксплуатации и в случаях, когда необходима защита от механических воздействий. Кабели с броней из стальных оцинкованных проволок применяются в тех местах, где есть растягивающие нагрузки в процессе эксплуатации, смещение почвы, при вертикальной прокладке. Для питания подвижных потребителей – проходческих и очистных комбайнов, самоходных вагонов, погрузочно-доставочных машин и т. д., используются только гибкие кабели на номинальное напряжение до 1000 В. Гибкие кабели, по сравнению с бронированными, в процессе работы испытывают повышенные растягивающие, изгибающие и осевые нагрузки. Помимо этого, возможны внешние механические воздействия, связанные с обвалом горной породы, истиранием наружной оболочки об поверхность кусков добываемой породы и металлических элементов электротехнического оборудования. Все перечисленное приводит к опасному повреждению и отказу кабельной линии. В общем виде для обеспечения необходимого срока службы конструкция гибких шахтных кабелей должна соответствовать следующим требованиям [3]:

- 1) высокая прочность на разрыв и стойкость к истиранию оболочки;
- 2) высокая эластичность резиновой смеси для шланговой оболочки (относительное удлинение при разрыве ϵ должно составлять не менее 300 %);
- 3) большая гибкость конструкции кабеля в целом, облегчающая условия его эксплуатации;
- 4) применение профилированного резинового сердечника, вокруг которого скручиваются медные жилы, опрессованные слоем изоляции. Резиновый сердечник в этом случае является эластичной подушкой, воспринимающей и равномерно распределяющей наибольшее давление, которому подвергаются отдельные жилы при механическом воздействии на кабель;
- 5) высокая электрическая прочность изоляции;
- 6) наличие заземляющей и вспомогательных жил для дистанционного управления, изоляция которых должна иметь отличительную окраску;
- 7) наличие экранов вокруг каждой жилы или общего концентрического экрана вокруг всех жил, обеспечивающих автоматическое отключение кабеля от сети при повреждении кабеля и замыкании любой жилы на заземленный экран.

Большинство из перечисленных требований касаются изоляции и оболочки, что также подтверждает важность этих конструктивных элементов с точки зрения надежности.

Гибкие кабели в настоящее время выпускаются с изоляцией из резины на основе хлоропренового каучука, бутилкаучука и этиленпропиленового каучука. Основным преимуществом этих материалов является высокая эластичность, позволяющая при прокладке допускать меньшие радиусы изгибов.

Резины на основе хлоропренового каучука имеют более высокую озоностойкость, светостойкость, чем

резины на основе натурального и бутадиен-стирольного каучука, отличную маслостойкость и обладают свойствами не распространять пламя при выносе кабеля из источников горения. Длительно допустимая рабочая температура этих резин на 10 °С выше, чем резин на основе натурального каучука. Существенный недостаток данного материала – небольшая механическая прочность при пониженных температурах [4].

Резины на основе бутилкаучука – продукт совместной полимеризации изобутилена с небольшим количеством изопрена в присутствии хлористого аммония или фтористого бора. Бутилкаучук обладает наименьшей газопроницаемостью и наибольшей влагонепроницаемостью из всех применяемых каучуков. Резины на его основе обладают высоким сопротивлением тепловому старению и стойки к воздействию озона, кислот и щелочей. При этом ряд недостатков ограничивает применение бутилкаучука: плохая совместимость с другими каучуками, небольшая эластичность при обычных температурах, низкая скорость вулканизации, растворимость и набухание в алифатических углеводородах и нестойкость к воздействию минеральных масел [5].

Этиленпропиленовый каучук имеет линейную структуру, причем двойные связи в нем полностью отсутствуют. В резиновой смеси на основе этиленпропиленового каучука можно ввести большое количество наполнителей (свыше 100 мас. ч.) без ухудшения их характеристик, что положительно сказывается на себестоимости. Кроме того, высоконаполненные подобные смеси обладают хорошими технологическими свойствами. Этиленпропиленовый каучук обладает высоким электрическим сопротивлением, стойкостью к термомеханической деструкции, влагонепроницаемостью, морозостойкостью. Кабели с изоляцией из этиленпропиленовой резины (ЭПР) имеют повышенную эластичность и гибкость. Это позволяет использовать такие кабели на участках сложной конфигурации с большим количеством ответвлений. Изоляция на основе этиленпропиленового каучука выдерживает длительно допустимую рабочую температуру до 90 °С. Помимо этого, появляется возможность избежать аварийных ситуаций при возгорании оборудования или коротком замыкании, так как температура плавления составляет 270 °С [6–8].

Анализ экспериментальных результатов [9–12] позволяет выделить ЭПР как перспективный материал изоляции низковольтных гибких кабелей. В то же время в технической литературе недостаточно информации об опыте применения ЭПР в качестве изоляции кабелей систем питания и управления горношахтного электрооборудования, отсутствуют рекомендации по оценке их ресурса. Практическое применение и серийное производство новых типов шахтных кабелей невозможно без проведения испытаний, подтверждающих требуемый уровень надежности. Разработка методики определения срока службы имеет большое научно-практическое значение, т. к. позволит спрогнозировать ресурс таких кабелей и выработать рекомендации по их применению с учетом специфики горнодобывающей отрасли.

Методическая часть

При испытаниях гибких кабелей с резиновой изоляцией применяют ряд методов, позволяющих оценить [13, 14]:

- механические свойства (стойкость к многократным изгибам с осевым кручением, стойкость к раздавливающим нагрузкам, статическая гибкость);
- маслостойкость;
- озоностойкость;
- стойкость к внешним воздействующим факторам и т. д.

Полученные результаты показывают стойкость материала к тем или иным внешним воздействиям, но не дают возможности определить срок службы кабеля. В современной технической литературе также нет рекомендаций по критериям оценки срока службы.

В низковольтных кабелях уровень воздействующих напряжений ниже напряжения начала ионизации. Следовательно, отсутствуют частичные разряды, приводящие к электрическому старению изоляции. Основным фактором, определяющим старение и износ изоляции, является температура [15–17]. С учетом этого при создании методики ресурсных испытаний приняты рекомендации, изложенные в [18] и основанные на прогнозировании срока службы при тепловом старении с определением энергии активации E_a процессов термической деструкции. Энергия активации – эмпирически определяемый параметр, характеризующий показательную зависимость константы скорости реакции от температуры. Повышение температуры приводит к увеличению скорости химических реакций, определяющих деградацию полимера, и ухудшению важнейших эксплуатационных характеристик.

При испытаниях электроизоляционных материалов в качестве контролируемой характеристики могут быть приняты: электрическая прочность, пробивное напряжение, удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, прочность и относительное удлинение при разрыве и т. д. [19].

В общем виде изменение свойств полимерных материалов в процессе теплового старения описывается уравнением Аррениуса, которое устанавливает зависимость константы скорости протекания реакций термической деструкции k от абсолютной температуры T :

$$\ln k = -\frac{E_a}{RT} + \ln A,$$

где T – абсолютная температура, К; R – универсальная газовая постоянная, $\frac{\text{Дж}}{\text{моль}\cdot\text{К}}$.

На практике используют более удобный вид обобщенного уравнения теплового старения:

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right). \quad (1)$$

Выражение (1) является основой для проведения ускоренных испытаний на тепловое старение с определением степени изменения контролируемого параметра электроизоляционного материала.

Проведение испытаний на тепловое старение лабораторных образцов

При ускоренных лабораторных испытаниях используется подход известный как «критерий конечной точки». В этом случае отказ воспринимается как достижение характеристик некоторого фиксированного значения по отношению к исходному уровню. Испытания, как правило, проводятся циклически.

Фактором, ускоряющим проведение испытаний, является температура. Максимальное значение температуры теплового старения выбирается исходя из представления о неизменности механизма старения испытуемого образца. Такая температура не должна приводить к изменению форм и геометрических размеров образца, а также к процессам, не имеющим места при нормальных условиях эксплуатации, например, деструкция материала, или разложение. Остальные температуры выбирают ниже максимально допустимой температуры с шагом не менее 10 °С [20, 21]. С учетом общих представлений о термостойкости ЭПР [6] приняты следующие температуры старения: 115, 130 и 150 °С.

Для резин, применяемых в гибких шахтных кабелях, наиболее важной характеристикой является относительное удлинение при разрыве ϵ [19]. Оценочным критерием истощения ресурса этиленпропиленовой резины является уменьшение относительного удлинения до 50 % ($\epsilon_{50\%}$) [20, 21].

При проведении испытаний используют испытательное оборудование и средства измерений: разрывная машин с погрешностью измерений $\pm 0,5$ %, климатическая камера тепла/термостат с погрешностью измерений ± 3 °С, микрометр с погрешностью измерений $\pm 0,01$ мм. Термическое старение проводят либо на образцах кабельного изделия, либо на образцах в виде двусторонних лопаток. Количество образцов должно быть не менее 5 на каждую контрольную точку. Старение проводят согласно [22, 23].

Продолжительность теплового старения при каждой температуре не должна быть меньше, чем требуется для получения существенных изменений относительного удлинения. С учетом рекомендаций [20, 21] разработана программа испытаний, представленная в табл. 1.

Таблица 1. Продолжительность циклов испытаний с учетом температуры старения

Table 1. Duration of test cycles taking into account the aging temperature

Температура старения $T, ^\circ\text{C}$ Aging temperature $T, ^\circ\text{C}$	Продолжительность теплового старения, ч Thermal aging duration, h						
115	75	168	320	1488	2250	2660	4680
130	75	168	320	1090	1740	2290	2500
150	75	168	320	340	360	380	400

Экспериментальная часть

В соответствии с принятой программой испытаний была проведена экспериментальная оценка изменения относительного удлинения при разрыве ϵ образцов ЭПР (рис. 1). После каждой контрольной точки образцы вынимали, кондиционировали не менее 16 часов и проводили испытания на разрывной машине.

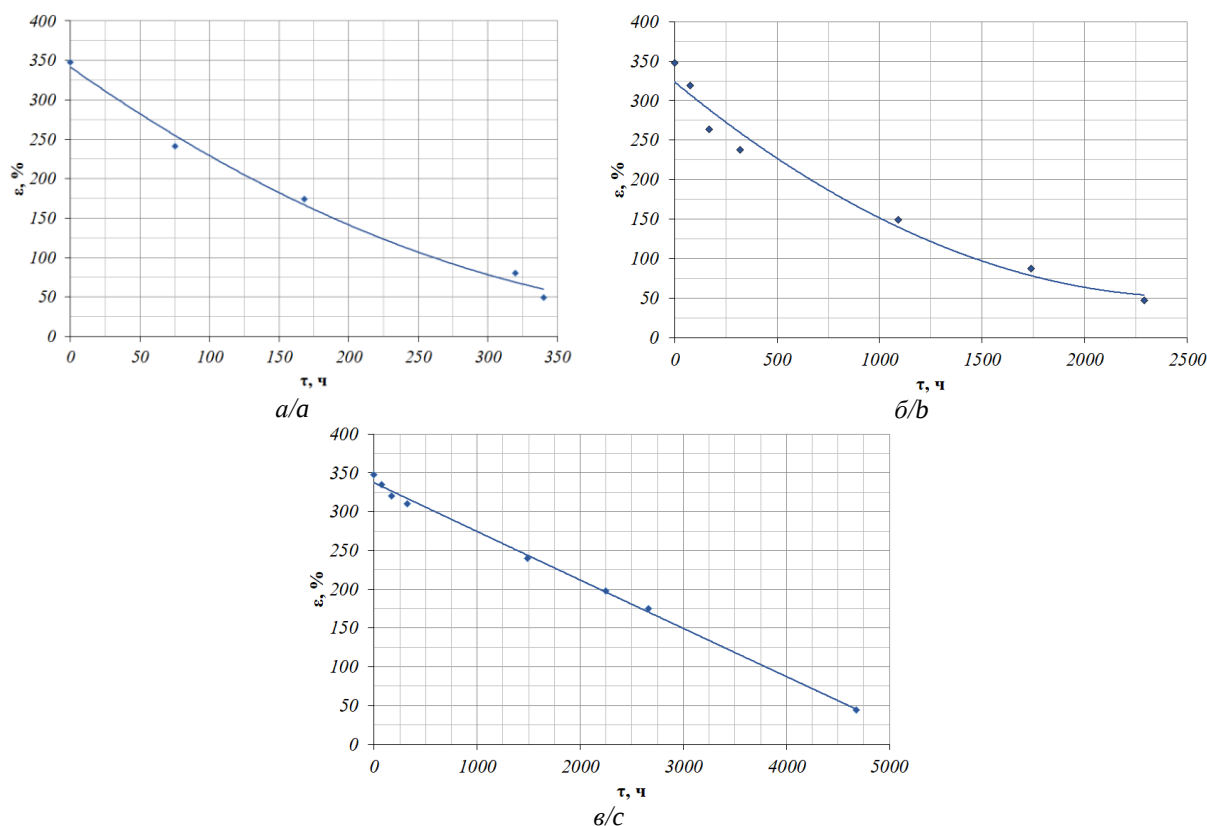


Рис. 1. Изменение относительного удлинения лабораторных образцов при температурах: а) 115; б) 130; в) 150 °С
Fig. 1. Elongation changes of laboratory samples during the thermal aging at: а) 115; б) 130; в) 150 °C

Результаты, приведенные на рис. 1, были обработаны методом наименьших квадратов. Установлено: изменение величины относительного удлинения при разрыве ε с учетом температуры и продолжительности старения τ описывается обратным полиномом второй степени.

Уравнения полинома второй степени, описывающие изменение механических свойств образцов ЭПР в интервале исследованных температур, имеют вид:

$$\varepsilon_{115^\circ\text{C}} = 0,0000001x^2 - 0,063x + 337,31,$$

$$\varepsilon_{130^\circ\text{C}} = 0,00004x^2 - 0,2148x + 323,89,$$

$$\varepsilon_{150^\circ\text{C}} = 0,0012x^2 - 1,2447x + 341,39.$$

Продолжительность старения до достижения предельного значения $\varepsilon_{50\%}$ с учетом температуры может быть определена экспериментальным путем по приведенной методике либо решением квадратного уравнения полинома второй степени.

Отечественные производители для новой продукции гибких кабелей нормируют минимальное значение относительного удлинения при разрыве не ниже 200 % [24]. С учетом этого определено время, при котором относительное удлинение изменяется в пределах от 200 до 50 %, характеризующее отказ изоляции (табл. 2).

Таблица 2. Длительность теплового старения образцов ЭПР с учетом степени изменения физико-механических свойств

Table 2. Thermal aging duration of samples with ethylene propylene taking into account the ratio of change in physical and mechanical properties

Температура старения, $T^\circ\text{C}$ Aging temperature, $^\circ\text{C}$	Продолжительность старения τ , ч/Thermal aging duration, h				
	Относительное удлинение/Elongation at break ε , %				
	200	150	100	70	50
150	129,849	187,747	258,215	311,711	356,9249
130	657,199	993,263	1415,364	1756,574	2083,356
115	2187,117	2987,34	3789,62	4271,98	4593,98

Полученные результаты временных интервалов, определяющие степень снижения механических свойств ЭПР, служат основой для определения срока службы при ускоренных испытаниях.

Срок службы при ускоренных испытаниях характеризуется построением линии регрессии, показывающей зависимость натурального логарифма времени $\ln(\tau)$ достижения критического значения контролируемого параметра к обратной температуре $1/T$ (рис. 2).

Используя метод наименьших квадратов, полученные уравнения линий регрессии в следующем виде:

$$\ln(\tau)_{200\%} = 13264 \left(\frac{1}{T} \right) - 26,469, \quad (2)$$

$$\ln(\tau)_{150\%} = 13020 \left(\frac{1}{T} \right) - 25,503, \quad (3)$$

$$\ln(\tau)_{100\%} = 12666 \left(\frac{1}{T} \right) - 24,323, \quad (4)$$

$$\ln(\tau)_{70\%} = 12366 \left(\frac{1}{T} \right) - 23,405, \quad (5)$$

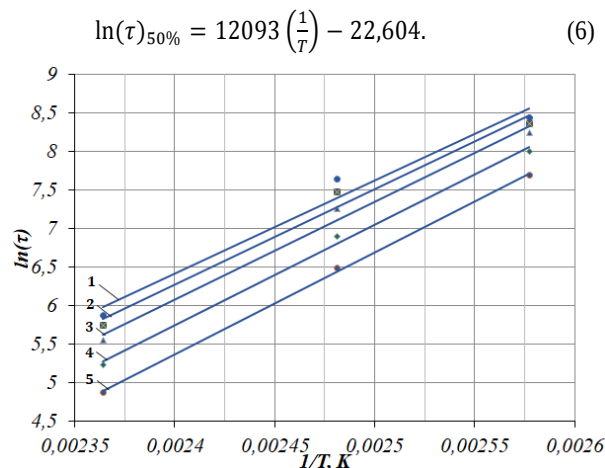


Рис. 2. Натуральный логарифм времени $\ln(\tau)$ достижения критического значения ϵ к обратной температуре ($1/T$): 1 – $\epsilon_{50\%}$, 2 – $\epsilon_{70\%}$, 3 – $\epsilon_{100\%}$, 4 – $\epsilon_{150\%}$, 5 – $\epsilon_{200\%}$

Fig. 2. Natural logarithm of critical value epsilon reaching time $\ln(\tau)$ as a function of reverse temperature: 1 – $\epsilon_{50\%}$, 2 – $\epsilon_{70\%}$, 3 – $\epsilon_{100\%}$, 4 – $\epsilon_{150\%}$, 5 – $\epsilon_{200\%}$

Прогнозирование ресурса электроизоляционных материалов при ускоренных испытаниях, основанное на уравнении Аррениуса, осуществляется с определением энергии активации процессов термической деградации.

Энергия активации определяется графическим способом по тангенсу угла наклона tga линии регрессии к оси абсцисс (2)–(6), (рис. 2):

$$Ea_i = R \cdot tga_i. \quad (7)$$

Результаты расчета энергии активации Ea_i приведены в табл. 3.

Таблица 3. Энергия активации Ea_i процесса разрушения образцов

Table 3. Activation energy Ea_i of samples destruction

Относительное удлинение Elongation at break ϵ , %	200	150	100	70	50
Энергия активации Ea , кДж/моль	110,28	108,25	105,30	102,81	100,54
Activation energy Ea , kJ/mol					

Для определения минимального срока службы принимаем меньшее значение энергии активации $Ea_{50\%} = 100,54 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ и рассчитываем для него среднеквадратичное отклонение.

Среднеквадратичное стандартное отклонение S_{tga} определяем по выражению [25]:

$$S_{tga} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\delta_{yi})^2}{(n-2)} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i^2}{n \cdot \sum_{i=1}^{i=n} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{i=n} x_i)^2} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\delta_{yi} = y_i - (tga \cdot x_i + b),$$

где x_i – i -е значение x ; y_i – i -е значение y ; n – число измерений; b – действительное число из уравнения (3), tga – тангенс угла наклона линии регрессии к оси абсцисс.

Таким образом, с учётом погрешности

$$Ea_{50\%} = 100,54 \pm 16,088 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}. \quad (8)$$

Определение энергии активации Ea позволяет перейти к количественному расчету показателей надежности.

Уровень надежности низковольтных гибких шахтных кабелей характеризуется сроком службы. Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после капитального ремонта до момента достижения предельного состояния. Продолжительность эксплуатации кабеля до его отказа характеризуется наработкой [26].

Срок службы изоляции сильно зависит от температуры старения и характеризуется нагревостойкостью. Нагревостойкость – способность электроизоляционного материала длительно выдерживать предельно допустимую температуру без признаков разрушения. Для данных кабелей с изоляцией из ЭПР принимается наработка на отказ 30000 часов [24]:

$$\ln(30000) = 10,31.$$

Используя полином второй степени (10), определяем длительно допустимую рабочую температуру кабеля с изоляцией из ЭПР:

$$12093 \left(\frac{1}{T} \right) - 22,604 = 10,31,$$

$$T = 367,42 \text{ К},$$

$$t = 367,42 - 273 = 94,42 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температурный индекс ЭПР составляет $90 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Поскольку надежность гибких шахтных кабелей главным образом определяется надежностью полимерной изоляции, допускается использовать результаты ресурсных испытаний электроизоляционных материалов для оценки срока службы кабельных изделий.

Используя полученные результаты энергии активации $Ea_{50\%}$ (7), (8) и уравнение (1) определяем срок службы для реальных температур эксплуатации (T_i) [18]:

$$\tau_{Ti} = \tau_n \cdot e^{-\frac{1}{R} Ea_{50\%} \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_i} \right)},$$

где τ_n – заданная минимальная наработка, час; T_p – длительно допустимая рабочая температура, $^\circ\text{C}$; T_i – температура эксплуатации, $^\circ\text{C}$.

Результаты расчета срока службы приведены в табл. 4.

Таблица 4. Срок службы τ_{Ti} гибких шахтных кабелей в зависимости от температуры эксплуатации

Table 4. Service life τ_{Ti} of flexible mining cables depending on the operating temperature

Температура эксплуатации Operating temperature T , $^\circ\text{C}$	70	75	80	90	100
Срок службы τ , год Service life τ , year	24,1	15,8	10,5	4,8	2,2

Заключение

Проведена оценка нагревостойкости образцов ЭПР на основе метода прогнозирования изменения физико-механических свойств. Методика основана на обобщенном уравнении теплового старения в соответствии с уравнением Аррениуса. Определены эмпи-

рические уравнения, описывающие изменение относительного удлинения ϵ с учетом температуры T . Путем линейной аппроксимации результатов испытаний при тепловом старении рассчитана энергия активации E_a процессов термической деструкции исследованного полимера. С учетом оценки погрешности даны рекомендации по сроку службы гибких шахтных кабелей с изоляцией из этиленпропиленовой резины при рабочих температурах, соответствующих температурному индексу 90 °С. Данный подход может быть применен для оценки времени работоспособности полимерных элект-

троизоляционных материалов в условиях пренебрежимо малого влияния электрического поля и внешних факторов на интенсивность процессов старения.

Исследование выполнено в рамках сотрудничества между Национальным исследовательским Томским политехническим университетом и АО «Научно-исследовательский кабельный институт "НИКИ г. Томск"». Результаты исследования использованы для разработки новой редакции ГОСТ 24334-2020 «Кабели силовые для нестационарной прокладки. Общие технические условия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reliability evaluation of power cables considering the restoration characteristic / H.M. Nematia, A. Sant'Anna, S. Nowaczyka, J.H. Jürgensen, P. Hilberb // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2019. – V. 105. – P. 622–631.
2. Wang J., Krstic M. Adaptive event-triggered PDE control for load-moving cable systems // *Automatica*. – 2021. – V. 129. – P. 109637–109657.
3. Красильников Г.В., Боев А.М., Бакиров А.Р. Разработка и внедрение безопасных кабелей в горнодобывающей промышленности // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2011. – № 11. – С. 293–297.
4. Regulation effects of trans-1, 4-poly (isoprene-co-butadiene) copolymer on the processability, aggregation structure and properties of chloroprene rubber / Xin Zong, Shuo Wang, Ning Li, Hongyu Li, Xinping Zhang, Aihua He // *Polymer*. – 2021. – V. 213. – P. 12325–12332.
5. Dubey V., Pandey S.K., Rao N.B.S.N. Research trends in the degradation of butyl rubber // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 1995. – V. 34. – P. 111–125.
6. Жданов Ю.С., Попов О.А. Применение этиленпропиленовой резины в кабельной технике // *Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. – 2014. – № 10. – С. 70–78.
7. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Наумов И.С. Особенности рецептур резин на основе этиленпропиленовых каучуков и их применение в изделиях специального назначения // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – № 2. – С. 51–55.
8. Lei Z., Li C., Men R. Mechanism of bulk charging behavior of ethylene propylene rubber subjected to surface charge accumulation // *Journal of Applied Physics*. – 2018. – V. 124. – P. 244103.
9. Useful lifetime prediction of rubber components using accelerated testing / Chang Su Woo, Sung Seen Choi, Seong Beom Lee, Hyun Sub Kim // *IEEE Transactions on reliability*. – 2010. – V. 59. – P. 11–17.
10. Mechanical aging trend in ethylene propylene rubber-insulated safety cables sampled from BWR nuclear power containment / N. Fuse, M. Kanegami, H. Misaka, H. Homma, T. Okamoto // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2014. – V. 21. – P. 571–581.
11. Breakdown performance and electrical aging life model of EPR used in coal mining cables / Yanwen Li, Muqin Tian, Zhipeng Lei, Jiancheng Song, Junxiang Zeng, Lingyan Lin, Yuanyuan Li // *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. – Chengdu, China: Chongqing University and Southwest Jiaotong University and Mississippi State University, 2016. – P. 1–4.
12. Dielectric and mechanical behavior of thermally aged EPR/CPE cable materials / N. Bowler, S.W. Glass, S. Leonard, S. Fifield // *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. – Mexico, 2018. – P. 11–17.
13. Degradation of mechanical and dielectric properties of flame-retardant ethylene propylene rubber by thermal aging / H. Yamaguchi, H. Ishii, N. Hirai and Y. Ohki // *IEEE Transactions on Electrical Electronic Engineering* – 2020. – V.15. – P. 488–495.
14. Aging in EPDM used for outdoor insulation / Y. Xu, Y. He, F. Zeng, R. Zhang // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* – 1999. – V. 6. – P. 60–65.
15. Dielectric strength of ethylene propylene rubber under thermal and mechanical stress / Yang Liu, Rujia Men, Muqin Tian, Ye Wang, Kunying Han, Zhipeng Lei, Chuanyang Li // *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. – China: Tsinghua University, 2020. – P. 135–138.
16. Cao L., Grzybowski S. Life-time characteristics of EPR cable insulation under electrical and thermal stresses // *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. – Italy: Department of Electrical Engineering of University, 2013. – P. 632–635.
17. Effect of thermal ageing on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage / R. Men, Z. Lei, J. Song, Y. Li, L. Lin, M. Tian, D. Fabiani, X. Xu // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2019. – V. 26. – P. 792–800.
18. ГОСТ Р 56722-2015. Пластмассы. Термогравиметрия полимеров. Ч. 2. Определение энергии активации. – М.: Стандартинформ, 2016. – 5 с.
19. Пешков И.Б. Материалы кабельного производства. – М.: Изд-во «Машиностроение», 2013. – 456 с.
20. ГОСТ 27710-88. Материалы электроизоляционные. Общие требования к методу испытаний на нагревостойкость. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 55 с.
21. ГОСТ 10518-88. Системы электрической изоляции и другие полимерные системы. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 30 с.
22. ГОСТ ИЕС 60811-501-2015. Кабели электрические и волоконно-оптические. Методы испытаний неметаллических материалов. Ч. 501. Механические испытания. Испытания для определения механических свойств композиций изоляции и оболочек. – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
23. ГОСТ ИЕС 60811-401-2015. Кабели электрические и волоконно-оптические. Методы испытаний неметаллических материалов. Ч. 401. Разные испытания. Методы теплового старения. Старение в термостате. – М.: Стандартинформ, 2015. – 14 с.
24. ТУ 16.К73.05-2021. Кабели силовые гибкие на напряжение 660 В. Технические условия. – Томск: НИКИ, 2021. – 55 с.
25. ГОСТ Р 57996-2017. Композиты полимерные. Дифференциальная сканирующая калориметрия. Определение энергии активации, предэкспоненциального множителя и порядка реакции. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
26. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

Поступила: 06.12.2021 г.

Информация об авторах

Леонов А.П., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Солдатенко Т.М., старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.315.211.9

EVALUATION OF INSULATION LIFETIME OF CABLES FOR POWER AND CONTROL SYSTEMS IN MINING ELECTRICAL EQUIPMENT

Andrey P. Leonov¹,
leonov_ap@tpu.ru

Tatyana M. Soldatenko¹,
ruhtinatm@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is provided by flexible cables design perfection for power and control systems of mining electrical equipment. The application of modern insulation materials is the main way for improving flexible cables properties. Currently, mining cables are produced with the rubber insulation. Advanced solution for improving the design of flexible mining cable is application of ethylene-propylene rubber, which has a higher heat resistance as compared to chloroprene and butyl rubber. The transmitted power is increased and a high values of thermal stability current at a short current and mechanical cycle flexibility is provided. The practical application of brand-new cables in the mining electrical equipment is impossible without lifetime characteristics testing. The lack of recommendations in the technical literature on the methodology of such tests requires studies to predict the service life, taking into account changes in the physical and mechanical properties of the ethylene-propylene rubber.

The main aim of the research is to develop the method and to determine the service life of flexible cables with ethylene-propylene rubber insulation for power and control systems of mining electrical equipment.

Objects: flexible mining cable, insulation, ethylene-propylene rubber, physical and mechanical properties, activation energy, service life.

Methods: experimental methods for evaluating the physical and mechanical properties, and heat resistance of polymeric materials; mathematical methods for solving nonlinear systems of equations and test results statistical analysis.

Results. The method for determining the service life of cables with ethylene-propylene rubber insulation was developed. This method is based on the physical and mechanical properties prediction considering the activation energy of thermal destruction processes. The service life of flexible mine cables is determined taking into account temperature.

Key words:

Mining electrical equipment, flexible mining cables, insulation, ethylene-propylene rubber, thermal aging, elongation at break, activation energy, service life.

The research was carried out within the relationship of National Research Tomsk Polytechnic University and «Research cable institute "NIKI, Tomsk"». The results of the research were used for developing a new version of the SS 24334-2020 «Supply cables for unsteady layer. General technical conditions».

REFERENCES

1. Nematia H.M., Sant'Anna A., Nowaczyka S., Jürgensenb J.H., Hilberb P. Reliability evaluation of power cables considering the restoration characteristic. *Electrical Power and Energy Systems*, 2019, vol. 105, pp. 622–631.
2. Wang J., Krstic M. Adaptive event-triggered PDE control for load-moving cable systems. *Automatica*, 2021, vol. 129, pp. 109637–109657.
3. Krasilnikov G.V., Boev A.M., Bakirov A.R. Development and introduction of safe cables in mining industry. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2011, no. 11, pp. 293–297. In Rus.
4. Xin Zong, Shuo Wang, Ning Li, Hongyu Li, Xinping Zhang, Aihua He. Regulation effects of trans-1, 4-poly (isoprene-cobutadiene) copolymer on the processability, aggregation structure and properties of chloroprene rubber. *Polymer*, 2021, vol. 213, pp.12325–12332.
5. Dubey V., Pandey S.K., Rao N.B.S.N. Research trends in the degradation of butyl rubber. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1995, vol. 34, pp. 111–125.
6. Zhdanov Yu.S., Popov O.A. Application of ethylene-propylene rubber in cable technology. *Herald Perm National Research Polytechnic University*, 2014, no. 10, pp. 70–78. In Rus.
7. Alifanov E.V., Chaykun A.M., Naumov I.S. Features of rubber formulas based on ethylene-propylene rubbers and their application in things of special purpose. *Scientific and Technical journal Aviation Materials and Technologies*, 2015, no. 2, pp. 51–55. In Rus.
8. Lei Z., Li C., Men R. Mechanism of bulk charging behavior of ethylene propylene rubber subjected to surface charge accumulation. *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 124, pp. 244103.
9. Chang Su Woo, Sung Seen Choi, Seong Beom Lee, Hyun Sub Kim. Useful lifetime prediction of rubber components using accelerated testing. *IEEE Transactions on reliability*, 2010, vol. 59, pp. 11–17.
10. Fuse N., Kanegami M., Misaka H., Homma H., Okamoto T. Mechanical aging trend in ethylene propylene rubber-insulated safety cables sampled from BWR nuclear power containment. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*, 2014, vol. 21, pp. 571–581.
11. Yanwen Li, Muqin Tian, Zhipeng Lei, Jiancheng Song, Junxiang Zeng, Lingyan Lin, Yuanyuan Li. Breakdown performance and electrical aging life model of EPR used in coal mining cables. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Chengdu, China, Chongqing University and Southwest Jiaotong University and Mississippi State University, 2016, pp. 1–4.
12. Bowler N., Glass S.W., Leonard S., Sriraman Fifield A., S.W. Dielectric and mechanical behavior of thermally aged EPR/CPE cable materials. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Mexico, 2018, pp. 11–17.
13. Yamaguchi H., Ishii H., Hirai V., Ohki Y. Degradation of mechanical and dielectric properties of flame-retardant ethylene propylene rubber by thermal aging. *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng*, 2020, vol. 15, pp. 488–495.
14. Xu Y., He Y., Zeng F., Zhang R. Aging in EPDM used for outdoor insulation. *IEEE Trans. DE*, 1999, vol. 6, pp. 60–65.
15. Yang Liu, Rujia Men, Muqin Tian, Ye Wang, Kunying Han, Zhipeng Lei, Chuanyang Li. Dielectric strength of ethylene propylene rubber under thermal and mechanical stress. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. China, Tsinghua University, 2020, pp. 135–138.

16. Cao L., Grzybowski S. Life-time characteristics of EPR cable insulation under electrical and thermal stresses. *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. Italy, Department of Electrical Engineering of University, 2013. pp. 632–635.
17. Men R., Lei Z., Song J., Li Y., Lin L., Tian M., Fabiani D., Xu X. Effect of thermal ageing on space charge in ethylene propylene rubber at DC voltage. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2019, vol. 26, pp. 792–800.
18. GOST P 56722. *Plastmassy. Termogravimetriya polimerov. Ch. 2. Opredelenie energii aktivatsii* [National Standard Plastics – Thermogravimetry (TG) of polymers – Part 2: Determinations of activation energy (MOD)]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 5 p.
19. Peshkov I.B. *Materialy kabelnogo proizvodstva* [Materials for cable production]. Moscow, Mashinostroenie Publ. house, 2013. 456 p.
20. GOST 27710-88. *Materialy elektroizolyatsionnye. Obshchie trebovaniya k metodu ispytaniy na nagrevostoykost* [SS 27710-88. Electrical insulating materials. General requirement for thermal endurance test method]. Moscow, Publishing house of standards, 1988. 55 p.
21. GOST 10518-88. *Sistemy elektricheskoy izolyatsii i drugie polimernye sistemy. Obshchie trebovaniya k metodam uskorennykh ispytaniy na nagrevostoykost* [SS 10518-88 Electric insulation systems and other polymer systems. General requirements for methods of accelerated tests for thermal endurance]. Moscow, Publishing house of standards, 1988. 30 p.
22. GOST IEC 60811-501-2015. *Kabeli elektricheskije i volokonno-opticheskie. Metody ispytaniy nemetallicheskih materialov. Ch. 501. Mekhanicheskie ispytaniya. Ispytaniya dlya opredeleniya mekhanicheskikh svoystv kompozitsy izolyatsii i obolochek* [Interstate standard 60811-501-2015 Electric and optical fibre cables. Test methods for non-metallic materials. P. 501. Mechanical tests. Tests for determining the mechanical properties of insulating and sheathing compounds]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 16 p.
23. GOST IEC 60811-401-2015. *Kabeli elektricheskije i volokonno-opticheskie. Metody ispytaniy nemetallicheskih materialov. Ch. 401. Raznyye ispytaniya. Metody teplovogo stareniya. Starenie v termostate* [Interstate standard 60811-401-2015 Electric and optical fibre cables. Test methods for non-metallic materials. P. 401. Miscellaneous tests. Thermal ageing methods. Ageing in an air oven]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 14 p.
24. TU 16.K73.05-2021. *Kabeli silovye gibkie na napryazhenie 660 V. Tekhnicheskie usloviya* [Specifications 16.K73.05-2021 Flexible power cables for rated voltage of 660 V]. Tomsk, Scientific and Research, Design-Engineering and Technological Cable Institute Tomsk, NIKI, 2021. 55 p.
25. GOST R 57996-2017. *Kompozity polimernye. Differentsialnaya skaniruyushchaya kalorimetriya. Opredelenie energii aktivatsii, predeksponentsialnogo mnozhitelya i poryadka reaktsii* [National Standard 57996-2017 Polymer composites. Differential scanning calorimetry. Determination of activation energy, pre-exponential factor and reaction order]. Moscow, StandardInform Publ., 2018. 20 p.
26. GOST 27.002-2015. *Nadezhnost v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [Interstate standard 27.002-2015 Dependability in technics. Terms and definitions]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 24 p.

Received: 6 December 2021.

Information about the authors

Andrey P. Leonov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Tatyana M. Soldatenko, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.