

УДК 621.3.048:621.315.61

А. Б. Власов, С. В. Власова, К. Б. Аллояров, В. А. Мухалев

Экспресс-диагностика свойств судовых кабелей, подвергнутых длительному старению

A. B. Vlasov, S. V. Vlasova, K. B. Alloyarov, V. A. Muhalev

The method of controlling the properties of rubber insulation of cables

Аннотация. Разработан метод контроля свойств резиновой изоляции кабелей, позволяющий оценивать техническое состояние изоляции в процессе старения. Метод опирается на измерение твердости изоляции при эксплуатации.

Abstract. The method of controlling the properties of rubber insulation of cables allowing evaluation of the technical condition of the insulation during aging has been developed. The method is based on measuring the hardness of the insulation during operation.

Ключевые слова: твердость изоляции, кабели, экспресс-метод диагностики, качество изоляции, старение изоляции кабелей.
Key words: hardness of insulation, cables, rapid method of diagnostics, quality of isolation, methods estimation technical condition, aging of cable insulation.

Введение

Аварии, происшествия на судах, связанные с нарушением изоляции силовых кабелей, самовозгоранием и разрушением изоляции приводят к значительным убыткам и катастрофам. В мировой практике до сих пор не создана система профилактических испытаний кабельной изоляции силовых кабелей неразрушающими методами, которая позволила бы оценивать остаточный ресурс и прогнозировать вероятность выхода кабеля из строя в процессе его эксплуатации. Осуществляется эпизодический контроль сопротивления на судах штатными приборами [1], но подобные процедуры не могут предотвратить аварийные ситуации и не дают информации об остаточном ресурсе кабеля.

Контроль надежности и оценка остаточного ресурса силовых кабелей могут быть осуществлены на основе измерения абсорбционных характеристик, динамических вольт-амперных характеристик, реверсивных и термостимулированных токов и другими технически сложно реализуемыми методами. Предложенная методика контроля свойств кабелей с резиновой изоляцией на основе анализа температурной зависимости электропроводности [2] также трудно реализуема при промышленной эксплуатации кабеля и его закреплении в пучке трассы.

Актуальной является разработка экспресс-методик для определения технического состояния кабельной изоляции, в том числе судовых кабелей с резиновой изоляцией, поиск диагностических параметров, которые, изменяясь со временем по мере старения изоляции, непосредственно связаны с процессом трещинообразования.

Подобным диагностическим параметром, по нашему мнению, может являться твердость материала изоляции, величина которой, как показывает практика, существенно изменяется в процессе старения изоляции.

Материалы и методы

1. Особенности кабелей с резиновой изоляцией

Отличительной особенностью судовых кабелей является наличие шланговой изоляции типа РШН; изоляция жилы выполняется из резины типа РТИ. Известно, что для подобных материалов доминирующим механизмом старения резины является протекание реакций окислительного дегидрохлорирования полихлоропрена, сопровождающихся изменением структуры пространственной сетки.

Срок службы кабелей включает время транспортировки, хранения, монтажа, эксплуатации до потери работоспособности, причем последний фактор является наиболее доминирующим. Согласно техническим условиям, критерием работоспособности кабелей после истечения срока службы являются: отсутствие на поверхности шланговой оболочки трещин по длине; соответствие электрического состояния изоляции жил требованиям по работоспособности системы, в которой находится кабель.

Фактический срок службы кабелей не ограничивается тем, что указан в технических условиях, а определяется состоянием кабелей к концу срока их службы. В процессе эксплуатации за счет десорбции наполнителей (рис. 1), протекающих химических реакций кабель теряет эластичность, гибкость, становится жестким. На его оболочке и изоляции жилы возникает сетка мелких трещинок, а затем – трещины, открывающие доступ влажному воздуху, загрязненным вплоть до металлической жилы. При этом в отсутствие загрязнений в сухом воздухе электрическое сопротивление кабеля с трещинами в объеме изоляции может оставаться относительно высоким, но оно резко падает во влажной или агрессивной

среде. Анализ и опыт эксплуатации кабелей с резиновой изоляцией показывает, что срок службы кабелей фактически ограничивается временем до момента появления трещин на поверхности шланговой изоляции кабеля.

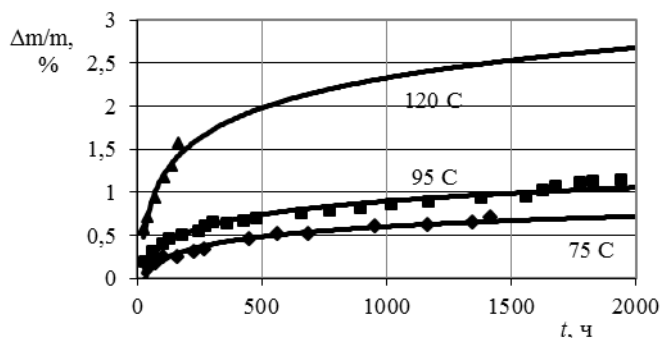


Рис. 1. Массопотери кабеля КНР (3 × 2,5) в процессе старения при различных температурах

Несмотря на распространенность подобных кабелей, срок их службы на судах не определен, так как сильно зависит от температуры эксплуатации. Срок службы кабелей с резиновой изоляцией при непрерывной эксплуатации при 65 °C составляет 6 лет [1]. В ряде помещений, например в котельных отделениях, у выходных коллекторов, в светильниках происходит образование трещин на поверхности кабеля через 2–3 года эксплуатации [3].

В работе [3], посвященной анализу взаимосвязи долговечности кабелей и их массопотерь при различных температурах, представлены результаты исследования, в которых обобщены данные, полученные при ускоренных испытаниях (табл.).

Таблица

Значения ресурса работы кабелей с резиновой изоляцией

Температура эксплуатации, °C	Ресурс работы, год		
	НРШМ	КНР	КНРГ
90	0,4	0,5	0,4
80	1,1	1,2	0,9
70	2,7	3	2
60	8	9	4
50	21	27	11

На основе ускоренных испытаний [3] различной изоляции оценены значения срока службы (табл.), по истечении которого кабель покрывается сеткой трещин и фактически теряет свои электроизоляционные свойства.

2. Объекты испытаний и методика обработки результатов

Авторами выдвинуто предположение, что оценкой качества изоляции до появления трещин может выступать диагностический параметр – твердость материала, предельное значение которого достигается в течение срока службы.

При оценке твердости материала изоляции анализировались судовые кабели (КНР, КНРЭ, КНРЭК, КВДНЭ-100, КРНЭГ-30, СМПВЭ, КНРЭВ и др.), которые находились в течение 25–30 лет как при комнатных, так и при повышенных температурах.

Оценка степени старения материала кабелей реализуется путем измерения твердости $H_i(HSA)$ материала изоляции по методу Шора. Твердость измеряется переносным измерителем твердости типа ТН-200, значения приводятся в пределах от 0 до 100 HSA. Достоинством данного метода является возможность определения твердости изоляции кабелей непосредственно в процессе эксплуатации, в том числе под напряжением без демонтажа трассы.

При испытаниях производилось исследование твердости шланговой изоляции и изоляции жилы на основе анализа данных выборки из $n = 25–30$ изменений. В ходе математической обработки данных рассчитывались: среднее значение \bar{H} , абсолютная погрешность ΔH с учетом коэффициента t_n Стьюдента (доверительная вероятность $P = 0,95$). В предположении, что экспериментальные данные описываются нормальным законом распределения, производился расчет функции распределения $F(x)$ и плотности распределения $f(x)$ стандартными методами.

Исходная изоляция кабелей характеризуется эластичными свойствами, так что значения твердости изоляции жилы, например для кабеля КНР, лежат в пределах $H_{из.ж} = (66,3 \pm 1,6) HSA$; твердость шланговой

изоляции – $H_{из.ш} = (79,1 \pm 1,9) HSA$. При многолетней (25–30 лет) выдержке кабелей при комнатной температуре твердость материала возрастает до относительно высоких значений $\underline{H}_{из.ш}$ (в диапазоне $\underline{H}_{из.ш} = 93 \dots 95 HSA$), однако на поверхности шланговой изоляции еще не образуются трещины.

Показано, что изоляция жилы кабеля КНР, состаренная и полностью разрушенная в результате пребывания на воздухе в течение более 40 лет, имеет значения твердости в диапазоне $H_{из.ж.в} = (94,5 \pm 1,5) HSA$.

Ускоренные испытания по старению кабельной изоляции (КНРГ), проводимые при повышенных температурах (110–140 °С), показали, что при средних значениях твердости в диапазоне $H_{из.ш} = (97,2 \pm 0,5) HSA$ на поверхности шланговой изоляции появляются сквозные трещины.

Испытания кабеля КНР ($3 \times 4 \text{ мм}^2$), состаренного в течение в течение 25 лет, показали: твердость изоляции жилы, находившейся в объеме шланга, составляет $H_{из.ж.ш} = (70 \pm 1,6) HSA$, в то время как 33 % поверхности изоляции жилы, находившейся в контакте с воздухом, имеют выраженные трещины при $H_{из.ж.в} = (92,5 \pm 1,6) HSA$, а 67 % поверхности изоляции не имеет трещин, но характеризуется относительно повышенной твердостью при $H_{из.ж.в} = (78,7 \pm 1,4) HSA$.

Можно сделать вывод о том, что трещины на поверхности шланговой изоляции появляются при средних значениях твердости материала более $\underline{H}_{из.ш} = (95–97) HSA$, в то время как в изоляции жилы трещины появляются при средних значениях $\underline{H}_{из.ж}$ в пределах (90–92) HSA.

3. Анализ вероятностных функций

Анализ качества состаренной изоляции с учетом оценки средних значений твердости \underline{H} (изоляции жилы или шланга) показывает, что данный диагностический параметр не является достаточно информативным, поскольку параметры твердости H_i изоляции элементов выборки изменяются в широких пределах.

В связи с этим, по нашему мнению, более достоверным является анализ вероятностных функций характеристик изоляции кабеля, который проведен следующим образом. В процессе испытаний измеряются значения H_i твердости анализируемой выборки, так что каждое значение твердости H_i – случайная величина, принимающая одно из возможных значений твердости в пределах определенного промежутка от H_{\min} до H_{\max} в результате испытаний. Совокупность значений выборки как значений случайной величины образуют статистический ряд. Для анализа такого ряда можно использовать разнообразные числовые характеристики статистики: среднее значение \underline{H} (математическое ожидание), стандартное отклонение σ и т. д. Характеристикой случайной величины H является закон распределения, имеющий две формы представления: функция распределения $F(H)$, определяющая вероятность появления случайной величины, принимает значения от 0 до 1 (интегральная функция); плотность распределения – $f(H) = dF(H)/dH$ (изменяется в пределах от 0 до 1), показывающая вероятность попадания случайной величины в заданный интервал и ее наиболее вероятные значения.

Полагается, что наиболее подходящим для описания твердости резиновой изоляции является нормальный закон распределения. Определение форм нормального распределения средствами Excel реализуется с помощью статистических функций. Например, функция НОРМРАСП (x ; \underline{H} ; σ ; интегральная), где x – значение случайной величины H_i , для которой определяются $F(x)$ и $f(x)$. Параметр "интегральная" – определяет форму распределения, для которой определяется значение ($F(x)$ – "ИСТИНА"; $f(x)$ – "ЛОЖЬ").

Алгоритм определения функции и плотности распределения может быть описан следующей процедурой:

- производятся испытания параметров твердости выборки H_i ;
- рассчитываются средние значения \underline{H} (функция "СРЗНАЧ") и стандартное отклонение σ ("СТАНДОТКЛОН");
- находятся пределы изменения случайной величины с учетом закона трех сигм (генеральная совокупность): $H_{\min} = \underline{H} - 3\sigma$; $H_{\max} = \underline{H} + 3\sigma$, округляются полученные значения;
- вычисляется шаг δH изменения случайной величины для определения интервала изменения генеральной совокупности: $\delta H = (H_{\max} - H_{\min})/n$, где n – количество значений в возможном интервале, задаваемом при испытании;
- записываются вероятные значения изменения величины H_i через шаг δH от H_{\min} до H_{\max} ;
- вычисляются значения функции распределения $F(H)$ и плотности распределения $f(H)$ с помощью функции НОРМРАСП;
- строятся графики функции $F(H)$ и плотности распределения $f(H)$ с помощью мастера диаграмм.

Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных на графиках функции распределения и плотности распределения (рис. 2) подтверждает выдвинутое предположение о нормальном законе распределения.

График функции распределения $F(H)$ служит для определения вероятности появления значения случайной величины. С его помощью можно решать две задачи:

- прямая задача – какова вероятность того, что значение случайной величины H будет не менее заданного значения, например (рис. 2, кривые 1 и 2) вероятность того, что значение H будет не менее 87,3 HSA равна $F = 0,5$;

– обратная задача – чему должна быть равна величина H , чтобы вероятность ее появления равнялась заданному значению. Например (рис. 2), вероятность $F = 0,81$ справедлива для значений $H \leq 90,8$ HSA.

График плотности распределения $f(H)$ показывает вероятность появления каждого значения случайной величины. Например (рис. 2, кривые 3 и 4), видно, что наиболее вероятно появление значения твердости шланговой изоляции, равного 87,3 HSA, так как наиболее вероятным значением случайной величины является ее математическое ожидание.

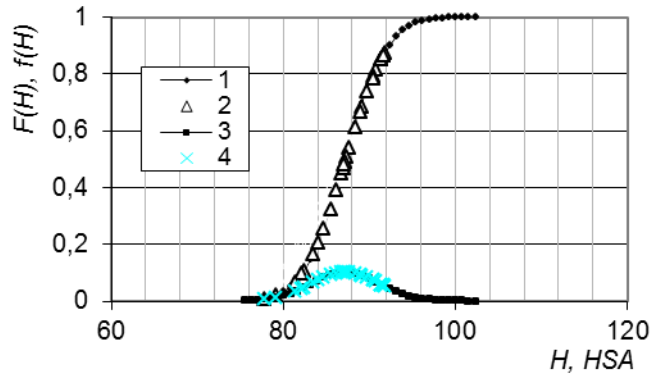


Рис. 2. Теоретические (1, 3) и экспериментальные (2, 4) зависимости функции распределения $F(H)$ и плотности распределения $f(H)$ (кабель КНР, шланговая изоляция, 25 лет)

В дальнейшем на графиках приведены значения функции распределения $F(H)$ и плотности распределения $f(H)$, рассчитанные по экспериментальным данным.

4. Твердость шланговой изоляции и изоляции жилы исходных кабелей

Проведем анализ параметров твердости состаренной шланговой изоляции и изоляции жилы с помощью статистических функций $F(H)$ и $f(H)$, алгоритм расчета которых представлен выше.

Исходная изоляция кабелей, а также изоляция кабелей, хранившихся в течение незначительного срока (не более полугода), характеризуется однородными и эластичными свойствами по длине кабеля (рис. 3, а, б). Это подтверждается относительно невысокими средними значениями \bar{H} и небольшим разбросом значений выборки ($\delta H = \Delta H / \bar{H} < 3\%$).

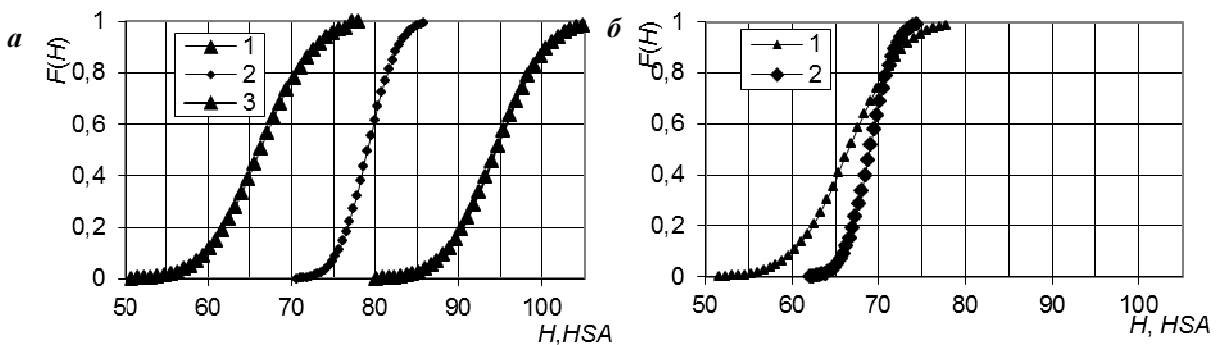


Рис. 3. Функции $F(H)$ для кабелей КНР $3 \times 1,5$ (а) и КНРЭ $2 \times 1,5$ (б):
1 – исходная изоляция жилы; 2 – исходная шланговая изоляция;
3 – полностью разрушенная изоляция жилы

Исходный кабель КНР ($3 \times 1,5$ мм²) характеризуется значениями твердости (рис. 3, а, кривые 1, 2): изоляция жилы $H_{из,ж} = (66,3 \pm 1,6)$ HSA; шланговая изоляция – $H_{из,ш} = (79,2 \pm 1,9)$ HSA. При этом в интервале $0 < F(H) < 1$ значения твердости $H_{из,ж}$ изоляции жилы изменяются в пределах от 50 HSA до 75 HSA; твердость $H_{из,ш}$ шланговой изоляции – в пределах от 70 HSA до 85 HSA.

Аналогичные данные получены при исследовании твердости материала изоляции исходного кабеля КНРЭ $2 \times 1,5$ мм² (рис. 3, б).

Для примера на рис. 3, а (кривая 3) приведены значения функции распределения для полностью разрушенной изоляции жилы кабеля типа КНР, находившейся на воздухе более 40 лет: более 50 % поверхности изоляции имеет твердость выше 95 HSA.

На рис. 4 приведены статистические функции $F(H)$ для твердости материала шланговой изоляции отдельных кабелей КНРЭ и КНР (кривые 2–4), состаренных в течение 30 лет при комнатных условиях,

а также шланговой изоляции кабеля КНРГ (кривая 1), ускоренно состаренного при повышенных температурах (120–140 °С) вплоть до появления сетки продольных и поперечных трещин в шланговой изоляции.

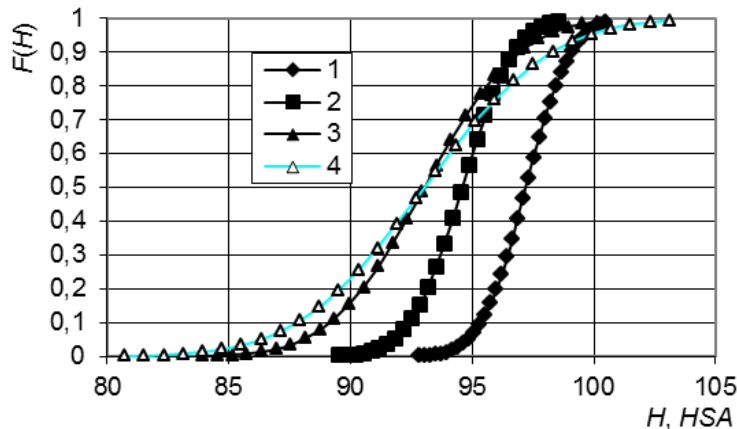


Рис. 4. Функции $F(H)$ для шланговой изоляции состаренных кабелей с резиновой изоляцией: 1 – КНРГ $3 \times 1,5 \text{ мм}^2$; 2 – КНРЭ $3 \times 2,5 \text{ мм}^2$; 3 – КНРЭ $24 \times 2,5 \text{ мм}^2$; 4 – КНР $2 \times 1,5 \text{ мм}^2$

Для кабеля КНРГ повышение твердости до средних значений выше $H_{\text{из.ш}} = 97 \text{ HSA}$ (рис. 4, кривая 1) сопровождается появлением трещин в отдельных участках шланговой изоляции; при этом более 50 % значений лежат в пределах $H_i = (97 \dots 104) \text{ HSA}$.

Анализ данных, приведенных на рис. 4, показывает, что старение кабелей при комнатных температурах (кривые 2–4) в течение 30 лет сопровождается повышением жесткости материала их шланговой изоляции, однако не приводит к появлению трещин, характеризующих потерю эксплуатационных свойств кабелей. Средние значения твердости шланговой изоляции (рис. 4, кривые 2–4) не превышают величин $H_{\text{из.ш}} = (92 \dots 95) \text{ HSA}$, а предельные значения в основном не достигают величин $H_{\text{из.ш.макс}} = (97 - 98) \text{ HSA}$.

Шланговая изоляция кабеля КНР при хранении в течение 25 лет при комнатных условиях практически утрачивает упругость (95 % значений лежат в пределах $H_{\text{из.ш}} < 92 \text{ HSA}$), но видимых поперечных трещин не наблюдается.

Изоляция жилы кабеля КНР, находящаяся в течение 25 лет в объеме ненарушенной шланговой изоляции (без доступа воздуха), характеризуется относительно хорошей упругостью при среднем значении твердости $H_{\text{из.ж.ш}} = 70 \text{ HSA}$ (сравни: для исходной изоляции жилы $H_{\text{из.ж}} = 66,3 \text{ HSA}$), а максимальные значения твердости не превышают $H_{\text{из.ж.макс}} = 82 \text{ HSA}$.

Изоляция жилы, находящаяся на воздухе 25 лет вне шланга, потеряла упругость, причем 33 % изоляции жилы (одна жила из трех) имеет выраженные поперечные трещины, при этом более 50 % значений имеют твердость более $H_{\text{из.ж.в}} = 92,5 \text{ HSA}$. Изоляция жилы, на поверхности которой отсутствуют трещины, имеет 50 % значений выше среднего значения ($\bar{H} = 78,7 \text{ HSA}$), при этом большинство значений твердости лежит в пределах $H_i < 92 \text{ HSA}$.

Идентичные значения получены при исследовании кабеля КНРЭК ($3 \times 1,5 \text{ мм}^2$), состаренного в течение 25 лет при комнатных условиях (рис. 5).

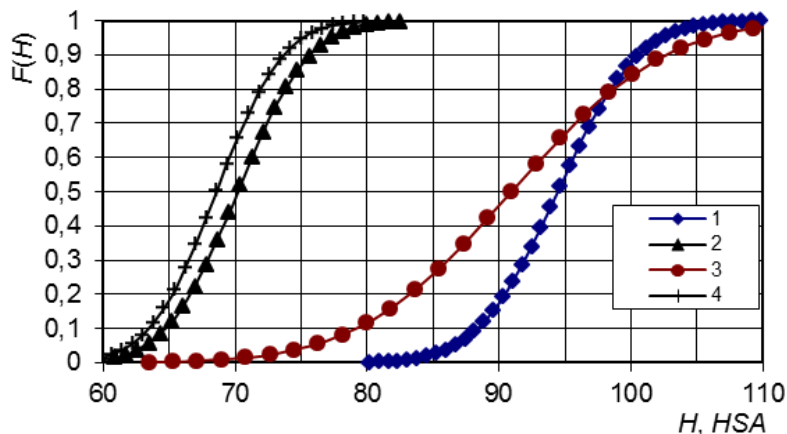


Рис. 5. Функция распределения $F(H)$ твердости изоляции жилы кабеля КНРЭК $3 \times 1,5 \text{ мм}^2$: 1 – изоляция жилы (более 40 лет старения); 2 – изоляция жилы кабеля КНР внутри шланга; 3 – изоляция жилы КНРЭК вне шланга (на воздухе) с трещинами; 4 – изоляция жилы КНРЭК внутри шланга

Анализ показывает, что более 50 % поверхности изоляции жилы кабеля КНРЭК, находящейся на воздухе в течение 25 лет, потеряло упругость, имеют поперечные трещины, при этом среднее значение $H_{из.ж.в} = 91 HSA$ (рис. 5, кривая 3), более 50 % значений превышают величину $H > 92 HSA$. В то же время изоляция жилы, находящаяся в объеме шланговой изоляции в течение 25 лет (без доступа воздуха), не потеряла упругих свойств (кривая 4) и по сравнению с аналогичной изоляцией кабеля КНР (кривая 2) имеет меньшее среднее значение H твердости. Это обусловлено более надежной шланговой изоляцией кабеля КНРЭК (поливинилхлоридный пластикат) по сравнению с резиновой изоляцией кабеля типа КНР.

На рис. 6 представлены функции распределения твердости шланговой изоляции различных кабелей КНР при их старении при комнатной температуре: со временем твердость монотонно возрастает. В течение первых лет старения свойства шланговой изоляции изменяются незначительно: среднее значение H возрастает, в основном за счет появления отдельных участков изоляции с повышенной твердостью. Через 15–30 лет по мере увеличения среднего значения появляются отдельные участки с повышенным значением твердости, и возрастает вероятность образования трещин.

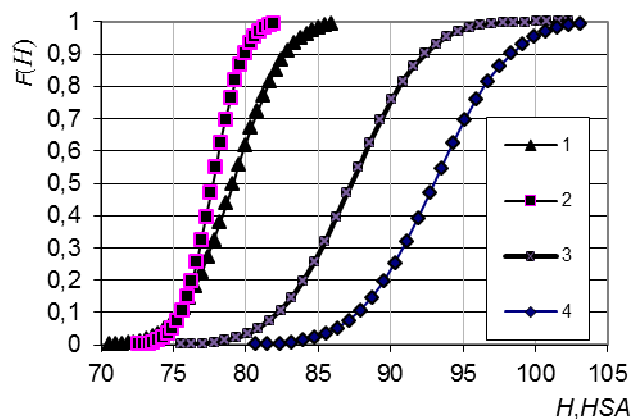


Рис. 6. Твердость шланговой изоляции кабелей со различным временем старения: 1 – КНР 3 × 2,5, 2 года; 2 – КНР 4 × 1,5, 0,5 года; 3 – КНР 3 × 4, 25 лет; 4 – КНР 3 × 4, 30 лет

По мере старения изоляции жилы кабеля КНР на воздухе среднее значение H твердости материала изменяется от 66 HSA (исходная изоляция жилы) до 95 HSA у кабелей с полностью разрушенной изоляцией.

5. Влияние температуры на твердость изоляции кабеля КНР в процессе старения

Для оценки влияния температуры и времени старения на твердость шланговой изоляции и изоляции жилы отрезки кабелей помещались в термостат и выдерживались при фиксированной температуре в течение длительного времени. Периодически твердость изоляции кабелей измерялась после их остывания на воздухе при комнатной температуре. После испытаний кабели вновь помещались в термостат и подвергались дальнейшему старению. Объективным критерием утраты изоляционных свойств является появление видимых трещин на изоляции при ее деформации.

На рис. 7–9 представлены результаты испытаний по исследованию твердости $H_{из.ж}$ изоляции жилы кабеля КНР (3 × 2,5 мм²) при старении при температуре 100 °С: со временем твердость изоляции жилы возрастает, достигая предельных значений, при которых на поверхности изоляции жилы появляются трещины.

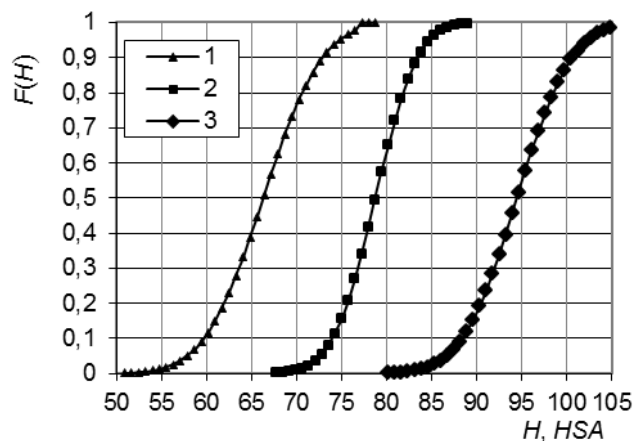


Рис. 7. Изменение твердости $H_{из.ж}$ изоляции жилы кабелей КНР с различным временем старения: 1 – исходный; 2 – 25 лет на воздухе; 3 – 40 лет на воздухе

Независимо от температуры по мере старения величина твердости изоляции жилы монотонно увеличивается при различных значениях функции $F(H)$ (рис. 8, 9). Например, через 200 часов старения при температуре 100 °С среднее значение твердости $H_{из.ж}$ возрастает с 70 HSA до 85 HSA, после чего остается относительно постоянной.

Старение изоляции жилы при более высокой температуре (130 °С) приводит к более ускоренному повышению твердости (рис. 10). При значениях времени старения более 300 часов значение твердости $H_{из.ж}$ изоляции жилы возрастает до $H_{0,5} = 87,8$ HSA, $H_{0,8} = 90$ HSA, $H_{0,9} = 91,5$ HSA, что сопровождается появлением сетки трещин на поверхности изоляции.

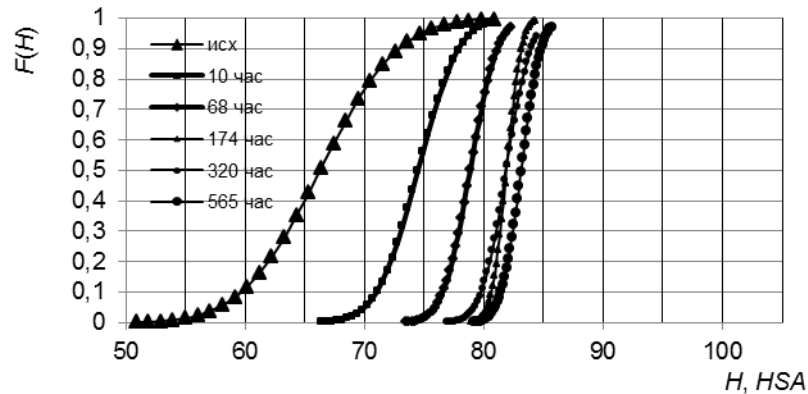


Рис. 8. Изменение функции распределения $F(H)$ твердости $H_{из.ж}$ изоляции жилы кабеля КНР $3 \times 2,5$ мм² со временем старения при $T = 100$ °С

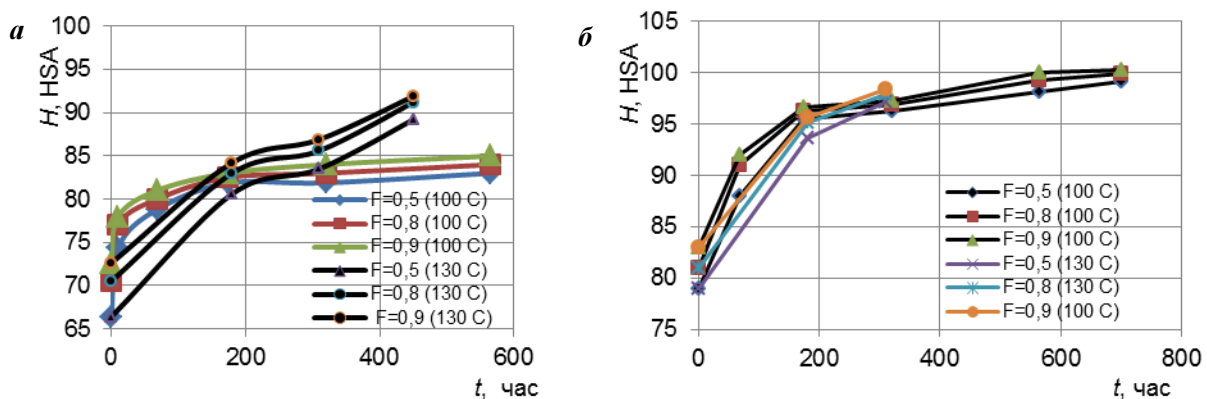


Рис. 9. Изменение твердости $H_{из.ж}$ изоляции жилы (а) и шланговой изоляции (б) кабеля КНР при различных значениях функции распределения и температурах старения

На рис. 11, 12 представлены результаты испытаний исследования твердости $H_{из.ш}$ шланговой изоляции кабеля КНР ($3 \times 2,5$ мм²) при температуре $T = 100$ °С: со временем твердость возрастает, достигая предельных значений, при которых на поверхности шланговой изоляции появляются трещины. По мере старения величина твердости шланговой изоляции при различных значениях функции распределения $F(H)$ монотонно увеличивается (рис. 9, 11).

Через 200 часов старения при температуре $T = 100$ °С среднее значение твердости $H_{из.ш}$ шланговой изоляции возрастает с 80 HSA до 95 HSA, после чего остается относительно постоянной. При значениях времени старения более 700 часов при $T = 100$ °С твердость $H_{из.ш.макс}$ шланговой изоляции возрастает до 100 HSA, что сопровождается появлением первых трещин (при сильном изгибе) на поверхности шланговой изоляции кабеля.

Старение шланговой изоляции при более высокой температуре (130 °С) приводит к более ускоренному старению (рис. 12). Уже при значениях времени старения более 300 часов твердость $H_{из.ш}$ шланговой изоляции возрастает до $H_{0,5} = 97,2$ HSA, $H_{0,8} = 98$ HSA, $H_{0,9} = 98,5$ HSA, что сопровождается появлением начальных трещин (при значительном изгибе) на поверхности изоляции.

На рис. 13, 14 представлены результаты испытаний изменения твердости $H_{из.ш}$ шланговой изоляции и $H_{из.ж}$ изоляции жилы кабеля КНРЭ ($3 \times 2,5$ мм²) при температуре $T = 130$ °С. Со временем твердость $H_{из.ш}$

шланговой изоляции возрастает, достигая предельных значений, при которых на поверхности изоляции появляются трещины. По мере старения величина твердости $H_{из.ш}$ шланговой изоляции увеличивается при различных значениях функции распределения $F(H)$.

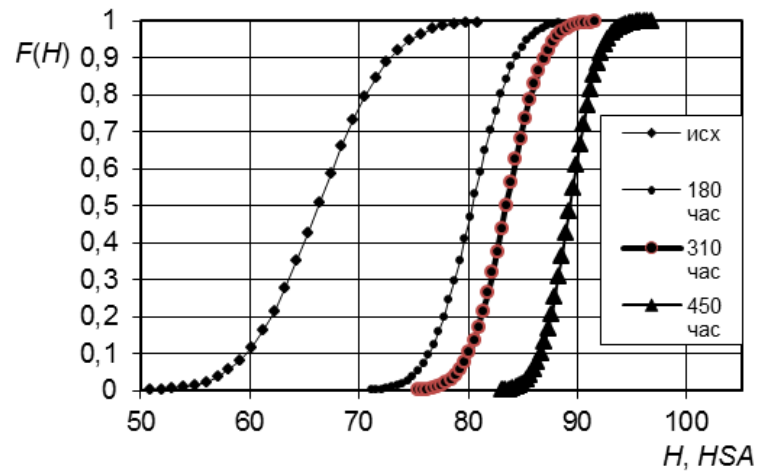


Рис. 10. Изменение функции распределения $F(H)$ твердости $H_{из.ж}$ изоляции жилы кабеля КНР $4 \times 1,5 \text{ мм}^2$ со временем старения при температуре $130 \text{ }^\circ\text{C}$

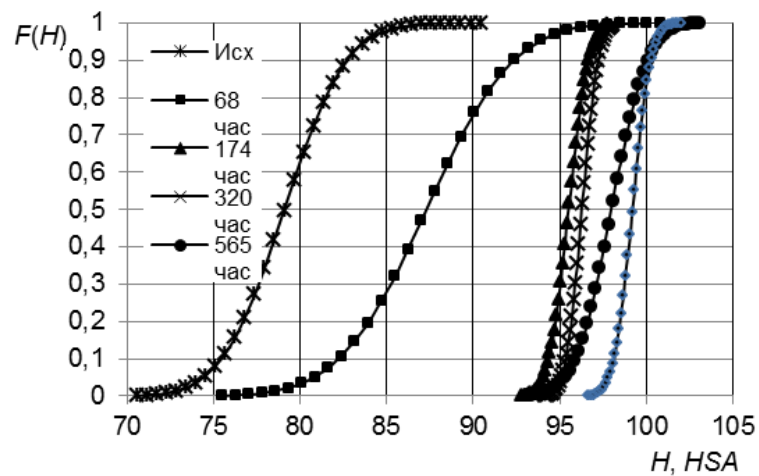


Рис. 11. Изменение функции распределения $F(H)$ твердости $H_{из.ш}$ шланговой изоляции кабеля КНР $3 \times 2,5 \text{ мм}^2$ со временем старения при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$

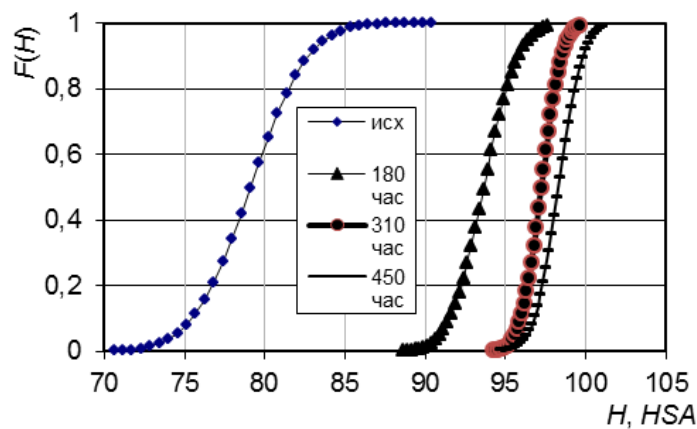


Рис. 12. Изменение функции распределения $F(H)$ твердости $H_{из.ш}$ шланговой изоляции кабеля КНР $4 \times 1,5 \text{ мм}^2$ со временем старения при температуре $130 \text{ }^\circ\text{C}$

При значениях времени старения более 300 часов твердость $H_{из,ш}$ шланговой изоляции жилы возрастает до $H_{0,5} = 95 HSA$, $H_{0,8} = 95,8 HSA$, $H_{0,9} = 96,2 HSA$, однако трещин на поверхности изоляции не обнаруживается и при значительном изгибе.

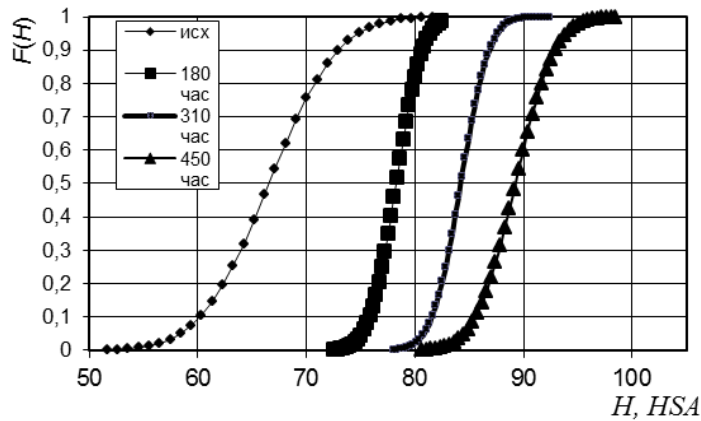


Рис. 13. Изменение функции распределения $F(H)$ твердости $H_{из,ж}$ изоляции жилы кабеля КНРЭ $2 \times 1,5 \text{ мм}^2$ со временем старения при температуре $130 \text{ }^\circ\text{C}$

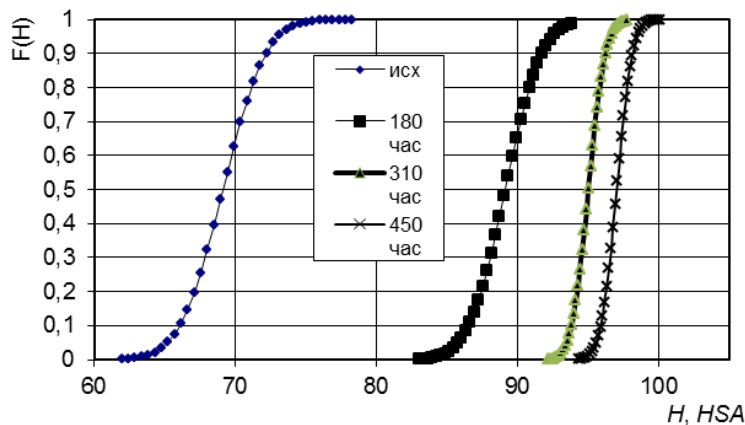


Рис. 14. Изменение функции распределения $F(H)$ твердости $H_{из,ш}$ шланговой изоляции кабеля КНРЭ $2 \times 1,5 \text{ мм}^2$ со временем старения при температуре $130 \text{ }^\circ\text{C}$

Выводы

Представленные результаты исследований твердости шланговой изоляции и изоляции жилы показывают, что предлагаемая методика позволяет выявить объективные статистические параметры твердости материала и производить диагностику качества изоляции в процессе эксплуатации без демонтажа кабельных трасс.

Превышение твердости материала изоляции жилы и шланговой изоляции выше определенных пределов является характеристикой аномального технического состояния кабельных трасс, предвестником процесса интенсивного трещинообразования и, как следствие, нарушения электроизоляционных свойств изделия.

Представляется целесообразным проведение регулярного аудита судовых кабельных трасс во всех помещениях и локальных участках, в особенности с повышенной температурой эксплуатации.

Наиболее проблемными участками кабельных трасс являются разделанные концы изоляции жил, примыкающие к контактным соединениям в блоках ГРЩ, светильников, распределительных коробок и т. п., которые подвержены ускоренному старению, в том числе за счет локального джоулевского нагрева металлических проводников и длительного контакта с воздушной средой.

Наиболее эффективным является проведение одновременных испытаний по анализу твердости изоляции и тепловизионной диагностики кабельных трасс, в ходе которой определяется карта теплового поля объекта и локализация участков с повышенной температурой [4].

Изменение качества изоляции кабелей переносным измерителем твердости актуально при оценке реального технического состояния судовых сетей и выбраковке состаренных участков кабельной трассы.

Предлагаемая методика экспресс-диагностирования кабельных трасс успешно апробирована на судах рыбопромыслового флота и атомных ледоколах.

Библиографический список

1. Белоруссов Н. И., Саакян А. Е., Яковлева А. И. Электрические кабели, провода и шнуры : справочник / под ред. Н. И. Белоруссова. М. : Энергоатомиздат, 1988. 536 с.
2. Власов А. Б., Маклаков В. Ф. Способ определения качества резиновой изоляции кабелей. Авторское свидетельство. Заявка на изобретение от 26.05.87 г. № 407662 (24-2) (067846), 4 01 К 31/02 (3 29.04.86) АС № 1394174.
3. Власов А. Б. К вопросу о сроке службы кабелей с резиновой изоляцией // Судостроение. 2003. № 1. С. 45–47.
4. Власов А. Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики. М. : Колос, 2006. 280 с.

References

1. Belorussov N. I., Saakyan A. E., Yakovleva A. I. Elektricheskie kabeli, provoda i shnury [The electric cables, wire and cords] : spravochnik / pod red. N. I. Belorussova. M. : Energoatomizdat, 1988. 536 p.
2. Vlasov A. B., Maklakov V. F. Sposob opredeleniya kachestva rezinovoy izolyatsii kabeley [Method of determining the quality of the cable insulation]. Avtorskoe svidetelstvo. Zayavka na izobretenie ot 26.05.87 g. N 407662 (24-2) (067846), 4 01 K 31/02 (3 29.04.86) AS N 1394174.
3. Vlasov A. B. K voprosu o sroke sluzhby kabeley s rezinovoy izolyatsiey [To the question of the lifetime of the cables with rubber insulation] // Sudostroenie. 2003. N 1. P. 45–47.
4. Vlasov A. B. Modeli i metody termograficheskoy diagnostiki ob'ektov energetiki [Models and methods of thermographic diagnostics of power facilities]. M. : Kolos, 2006. 280 p.

Сведения об авторах

Власов Анатолий Борисович – ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет", Морской институт, кафедра электрооборудования судов, д-р техн. наук, профессор; e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru

Vlasov A. B. – FSEI HPE "Murmansk State Technical University", Marine Institute, Ship Electrical Equipment Department, Dr of Tech. Sci., Professor; e-mail: vlasovab@mstu.edu.ru

Власова Светлана Васильевна – ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет", Факультет арктических технологий, кафедра общей и прикладной физики, д-р филос. наук, канд. техн. наук, профессор; e-mail: vlasovasv@mstu.edu.ru

Vlasova S. V. – FSEI HPE "Murmansk State Technical University", Faculty of Arctic Technologies, Department of General and Applied Physics, Dr of Philos. Sci., Cand. of Tech. Sci., Professor; e-mail: vlasovasv@mstu.edu.ru

Аллоярров Константин Борисович – ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет", Морской институт, кафедра электрооборудования судов, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: k-alloyarov@yandex.ru

Аллоярров К. В. – FSEI HPE "Murmansk State Technical University", Marine Institute, Ship Electrical Equipment Department, Cand. of Tech. Sci., Senior Researcher; e-mail: k-alloyarov@yandex.ru

Мухалев Валерий Алексеевич – ФГБОУ ВПО "Мурманский государственный технический университет", Морской институт, кафедра электрооборудования судов, мл. науч. сотрудник; e-mail: muhalev2606 @yandex.ru

Muhalev V. A. – FSEI HPE "Murmansk State Technical University", Marine Institute, Ship Electrical Equipment Department, Junior Researcher; e-mail: muhalev2606 @yandex.ru