

# СВОЙСТВА ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСОВ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**А.Н. Фризен**, генеральный директор ОАО «Севкабель–Холдинг»;  
**А.В. Петров**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника» Электротехнического института Томского политехнического университета

Определение остаточного ресурса изоляции кабельных изделий, работающих в экстремальных условиях, является довольно сложной задачей, не имеющей однозначного решения. Это связано как с многообразием эксплуатационных факторов, так и с трудностями по выявлению наиболее информативных параметров, адекватно отражающих процессы деградации изоляции [1, 2, 3].

Поэтому практический интерес представляет выяснение основных закономерностей сорбции пластовой жидкости в объеме электрической изоляции, определение параметров уравнения диффузии и выбор однозначного критерия стойкости к воздействию внешней среды. Многочисленные экспериментальные данные, приведенные в работе [5], подтверждают возможность

разработки такого формализованного критерия оценки фактического состояния электрической изоляции по величине ее электрического сопротивления.

В этой статье представлены экспериментальные данные по старению изоляции кабеля для питания погружных электронасосов добычи нефти (далее – кабеля) в пластовой жидкости. Исследования сорбционных свойств блоксополимера полиэтилена (СПЭ 02-МК) и этиленпропиленовой резины (ЭПР) производились на плоских образцах толщиной 2 мм, состаренных в автоклавах в течение 300 ÷ 1500 часов при температурах 120, 140 и 160 °С в имитаторе пластовой жидкости, состоящей из воды, машинного масла и ионов солей ( $NaCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $FeCl_3$ ,  $KJ$ ). Взвешивание образцов производилось на аналитических весах. Для измерений сопротивления применялся универсальный вольтметр-электрометр, погрешность измерений при этом не превышала 10 %.

## Сорбционные свойства исследуемых материалов

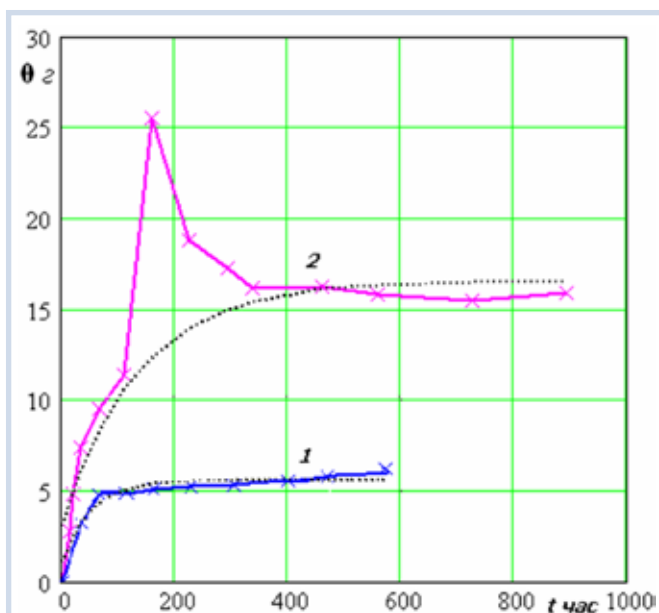
Общий характер временной зависимости сорбции агрессивной среды для блоксополимера СПЭ 02-МК при температурах старения 120 и 140 °С в пластовой жидкости представлен на рис. 1.

Привес образцов обусловлен диффузией пластовой жидкости в материал. После достижения определенного времени сорбция прекращается и вес образцов достигает установившегося значения ( $Q_{\infty}/m_0$ ). Величина сорбции ( $\varphi$ ) рассчитывается как

$$\varphi = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $m_0$  – исходный вес образца;  $m$  – вес образца к моменту времени  $t$ .

Количество пластовой жидкости  $\theta$ , абсорбированной испытываемым материалом к моменту времени  $t$ , определялось как



**Рис. 1.** Зависимости сорбции пластовой жидкости для блоксополимера СПЭ 02-МК при различных температурах: 1 – температура 120 °С; 2 – температура 140 °С; ... – расчетные данные

$$\theta = m - m_0 \quad (2)$$

Как следует из приведенных результатов, старение блоксополимера в пластовой жидкости при температуре 120 °С не приводит к сколь-нибудь заметно вымыванию низкомолекулярных продуктов и водорастворимых примесей. Однако, судя по постоянному увеличению веса образцов в течение почти 600 часов старения и значительному водопоглощению ( $\varphi = 40\%$ ), можно предположить, что происходит ограниченное набухание блоксополимера под действием органических компонентов пластовой жидкости. Так как полимер при температуре испытания находится в высокоэластическом состоянии, то процесс диффузии жидкой среды идет в основном по его аморфным областям. После 300 часов старения на поверхностях образцов стали появляться вздутия, которые представляли собой полости, заполненные частично заполимеризовавшимся нефтяным маслом. Размеры полостей увеличивались по мере старения и в конце опыта достигали в поперечнике до 8–10 мм. По-видимому, неполярные молекулы нефтяного масла, диффундируя по аморфным участкам объема полимера, задерживаются около полярных частиц наполнителя, который, возможно, играет еще и роль катализатора полимеризации масла, что уменьшает или делает невозможным дальнейшее продвижение этих молекул и способствует их накоплению с формированием макрополостей.

Образованию агрегатов молекул растворителя в полимерной матрице способствуют также внутренние механические напряжения, возникающие на фронте растворителя, и микротрещины. Подобное явление наблюдается и в полиэтилене [4].

Повышение температуры пластовой жидкости до 140 °С приводит к значительному изменению диффузионных свойств блоксополимера. При этой температуре аморфные области полимера переходят в вязкотекучее состояние. Возможно также, что происходит плавление мелких кристаллических образований.

В высокоэластическом состоянии аморфную часть полимера следует рассматривать как область наиболее дефектных мест кристаллической решетки. Низкомолекулярные вещества мобилизуются преимущественно в аморфных и дефектных областях полипропилена, по этим же областям протекает и диффузия [5].

Все эти факторы приводят к увеличению свободного объема полимера, уменьшению сил межмолекулярного взаимодействия и как следствие – повышению скорости диффузионных процессов.

Экспериментальные исследования блоксополимера СПЭ 02-МК в пластовой жидкости при температуре старения 140 °С показали, что произошло значительное увеличение набухания. Наблюдается частичное растворение полимера в органической компоненте пластовой жидкости. Такое состояние полимера обусловлено более высокой концентрацией молекул масла в объеме образца из-за увеличения аморфной части блоксополимера. Одновременно

происходит вымывание из блоксополимера водорастворимых примесей и низкомолекулярных фракций. Сорбция достигает установившегося значения при  $\varphi_\infty = 110\%$ . Состаренные образцы утратили первоначальную жесткость и приобрели высокую эластичность, подобную резине.

Структурный фактор у полимерных материалов играет большую роль в водо- и влагопоглощении. Как правило, полимеры с трехмерной структурой имеют сильно разветвленные молекулы, что снижает плотность упаковки макромолекул, увеличивает скорость диффузии и величину равновесного поглощения жидкости.

Для ЭПР наблюдается преимущественно осмотический характер сорбции, так как она имеет в своем составе водорастворимые примеси, содержащиеся в минеральном наполнителе [6].

Общий характер полученных закономерностей сорбции пластовой жидкости для ЭПР при температурах старения 140 и 160 °С представлен на рис. 2. Равновесное поглощение пластовой жидкости для ЭПР при температуре старения 140 °С достигает  $\varphi_\infty = 122\%$  (рис. 2). При температуре старения 160 °С установившееся значение поглощения составляет  $\varphi_\infty = 118\%$ .

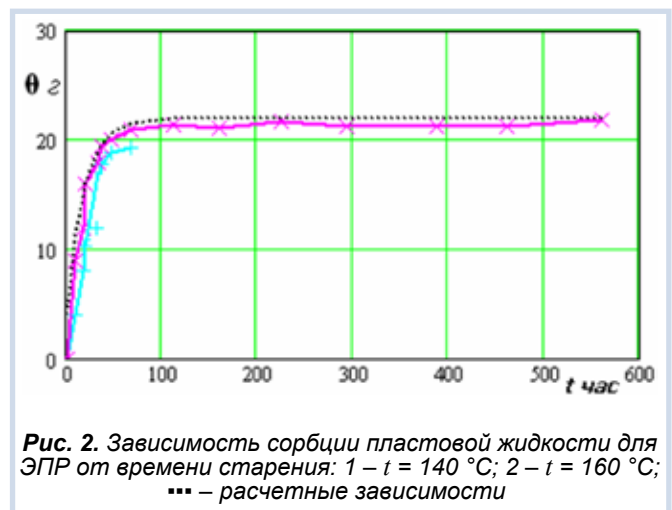


Рис. 2. Зависимость сорбции пластовой жидкости для ЭПР от времени старения: 1 –  $t = 140\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 160\text{ }^\circ\text{C}$ ; --- – расчетные зависимости

Количественно кривые равновесной влажности при более высоких температурах сорбции идут, как правило, ниже, что свидетельствует о протекании процессов довулканизации резины в начальный период ее старения. Как и для блоксополимера, в ЭПР наблюдается аномально высокое равновесное поглощение пластовой жидкости, что связано со значительным набуханием этого материала в имитаторе пластовой жидкости. Резина, состаренная при температурах 160 и 180 °С, вышла из строя при времени старения около 150 часов. Образцы легко разрывались при небольшом усилии, что делало их непригодными для эксперимента. Образцы ЭПР, состаренные при температуре 140 °С, разрушились после 560 часов старения.

Структура наполненного полимера способствует появлению разнообразных механизмов диффу-

зии в различных участках системы полимер – наполнитель. В реальных системах коэффициент диффузии непостоянен, он является сложной функцией ряда параметров и в первую очередь зависит от концентрации диффундирующего вещества, размеров и формы диффундирующих молекул, что позволяет рассматривать полученные экспериментальные значения коэффициента диффузии  $D$  лишь как его некоторое эффективное значение [4].

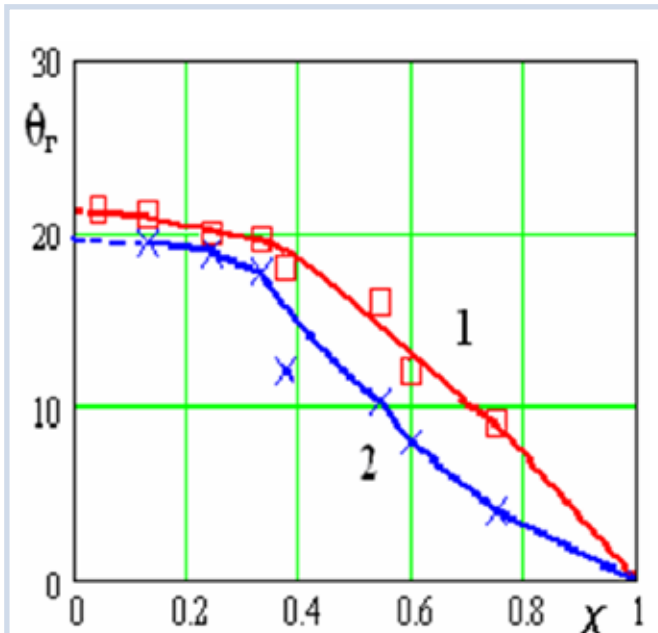


Рис. 3. Определение равновесного поглощения пластовой жидкости для ЭПР: 1 –  $t = 140\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 160\text{ }^\circ\text{C}$

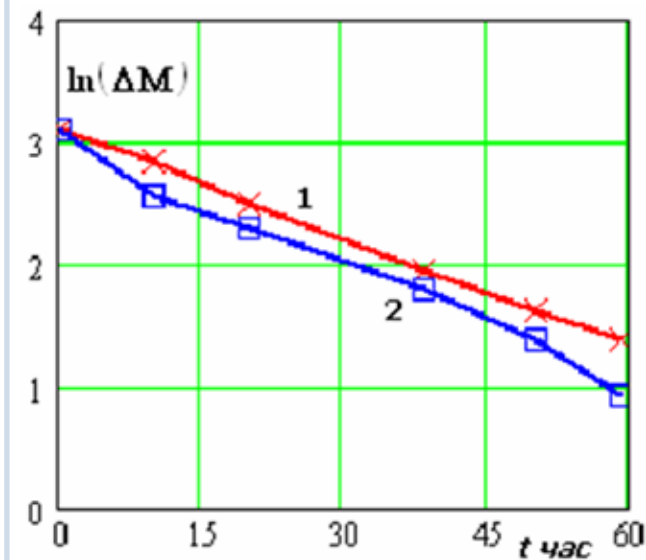


Рис. 4. Зависимость  $\ln \Delta M$  от времени старения ЭПР в пластовой жидкости: 1 –  $t = 140\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t = 160\text{ }^\circ\text{C}$

Поскольку процессы сорбции в диэлектриках являются достаточно длительными, то для получения более точного значения равновесного поглощения

жидкости ( $\theta_\infty$ ) по экспериментальным данным были построены зависимости  $\theta = f(x)$ , где  $x = e^{-2 \cdot t}$ , а  $t$  – время старения. Экстраполируя эти зависимости к  $t = \infty$ , получили значения равновесного поглощения ( $\theta_\infty$ ) [7]. На рис. 3 показаны эти зависимости для ЭПР при двух температурах старения. Экспериментальные значения  $\varphi_\infty$  приведены в таблице.

Для расчета усредненного значения коэффициента диффузии применен метод Давыдова – Журкова [3]. С этой целью результаты взвешивания образцов в процессе старения в пластовой жидкости представлены на рис. 4 в координатах  $\ln \Delta M = f(t)$ . По углу наклона полученной зависимости к оси абсцисс рассчитывается коэффициент диффузии  $D_g$ :

$$D = \frac{d^2}{\pi^2} \cdot \frac{\Delta \ln(m_\infty - m)}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $\Delta M = (m_\infty - m)$ ;  $m_\infty$  – вес образца при достижении равновесного поглощения пластовой жидкости.

Расчетные значения коэффициентов диффузии исследуемых материалов убывают с повышением температуры старения (табл.). Для ЭПР это может быть связано с процессом довулканизации в начальный период старения. Повышение температуры старения со  $140$  до  $160\text{ }^\circ\text{C}$  приводит к увеличению густоты пространственной сетки. Для блоксополимера снижение коэффициента диффузии и увеличение  $\varphi_\infty$  при повышении температуры старения со  $120$  до  $140\text{ }^\circ\text{C}$  связаны, по-видимому, со значительным повышением доли молекул масла, диффундирующих в объем полимера, по сравнению с водой [5]. Об этом свидетельствует и резкое повышение эластичности состаренных образцов.

Теоретические кривые сорбции, рассчитанные по уравнению Эндрюса и Джонсона (4), находятся в удовлетворительном соответствии с экспериментальными данными (см. пунктирные линии на рис. 1 и 2):

$$\theta = \theta_\infty \cdot \left( 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot D \cdot t}{4 \cdot h^2}} \right), \quad (4)$$

где  $h$  – половина толщины образца,  $m$ .

Величина равновесного поглощения пластовой жидкости при заданной температуре старения является одним из важнейших критериев стойкости материала к воздействию среды. Каждый материал в условиях насыщения будет характеризоваться вполне определенными, присущими только ему, диэлектрическими и механическими свойствами.

### Температурные зависимости удельного сопротивления исследуемых материалов в процессе старения

Экспериментальные зависимости электропроводности изоляции подобны кривым сорбции, и, следова-

Сорбционные свойства исследуемых материалов

Параметр	СПЭ 02-МК		ЭПР	
	$T_{ст} = 120\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{ст} = 140\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{ст} = 140\text{ }^\circ\text{C}$	$T_{ст} = 160\text{ }^\circ\text{C}$
$B\text{ час}^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	—
$\varphi_\infty\%$	40	110	122	119
$D \cdot 10^{12}\text{ м}^2/\text{с}$	2,8	2,0	1,5	0,73
$W\text{ кДж/моль}$	64	50	59,4	—
$\rho_{\infty ОМ} \cdot m (T_{изм} = 20\text{ }^\circ\text{C})$	$1,26 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{11}$	$6,3 \cdot 10^{11}$	—
$\rho_H ОМ \cdot m$	$1 \cdot 10^{15}$		$6,4 \cdot 10^{13}$	

тельно, по ним можно судить о достижении материалом равновесного поглощения пластовой жидкости.

Полагая, что уменьшение сопротивления на начальном этапе старения диэлектриков в пластовой жидкости при постоянной температуре связано преимущественно с сорбционными процессами, можно записать:

$$\rho(t) = \frac{\rho_H}{\left[ 1 + \varphi_\infty \cdot A \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\pi^2 D \cdot t}{4 \cdot h^2}} \right) \right]}, \quad (5)$$

где  $\varphi_\infty$  – равновесное значение коэффициента сорбции в относительных единицах;  $A$  – поправочный коэффициент, характеризующий изменение сопротивления от исходного значения до установившегося в процессе сорбции пластовой жидкости.

$$A = \frac{1}{\varphi_\infty} \cdot \left( \frac{\rho_H}{\rho_\infty} - 1 \right). \quad (6)$$

Учитывая уравнение (6) и то, что постоянная скорости процесса диффузии  $t = \frac{4 \cdot h^2}{\rho^2 \cdot D}$ , выражение (5) можно представить в виде:

$$\rho(t) = \frac{\rho_H}{1 + \left( \frac{\rho_H}{\rho_\infty} - 1 \right) \cdot \left( 1 - e^{-t/\tau} \right)}. \quad (7)$$

Если  $\rho_H$  и  $\rho_\infty$  отличаются на два порядка и более, уравнение (7) принимает вид:

$$\rho(t) = \frac{\rho_H}{1 + \frac{\rho_H}{\rho_\infty} \cdot \left( 1 - e^{-t/\tau} \right)}. \quad (7a)$$

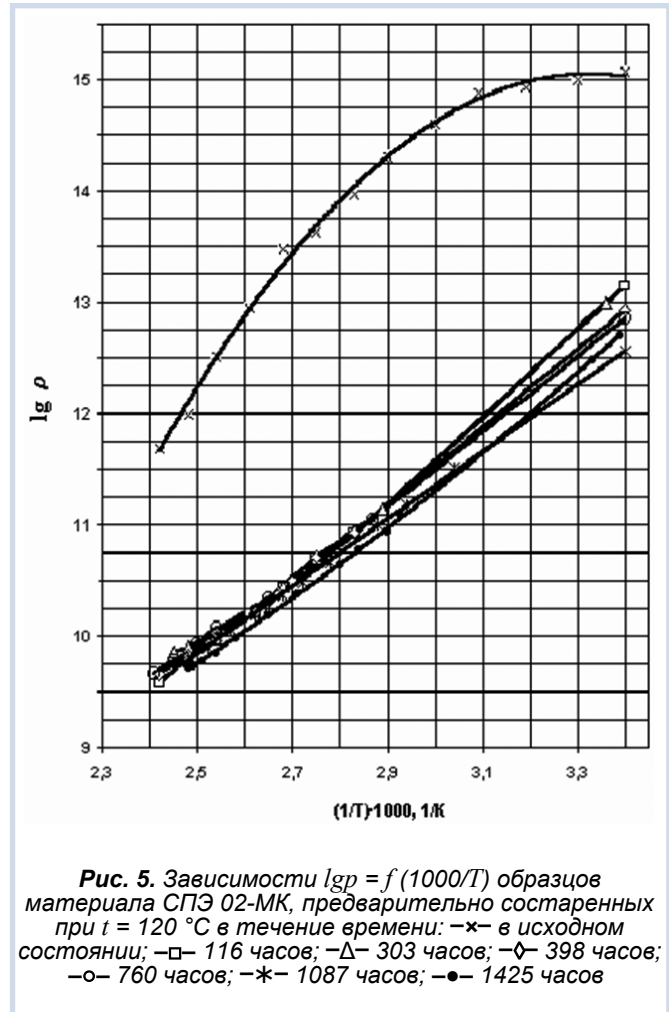


Рис. 5. Зависимости  $lg\rho = f(1000/T)$  образцов материала СПЭ 02-МК, предварительно состаренных при  $t = 120\text{ }^\circ\text{C}$  в течение времени:  $\times$  – в исходном состоянии;  $\square$  – 116 часов;  $\triangle$  – 303 часов;  $\diamond$  – 398 часов;  $\circ$  – 760 часов;  $*$  – 1087 часов;  $\bullet$  – 1425 часов

При достижении равновесной сорбции, когда  $t > \tau$ , уравнение (7) может быть представлено как:

$$\rho(t) = \rho_\infty. \quad (8)$$

На рис. 5 приведены температурные зависимости удельного сопротивления блоксополимера СПЭ 02-МК, полученные для различных времен старения в пластовой жидкости при температуре  $120\text{ }^\circ\text{C}$ . Подобные зависимости были исследованы и для ЭПР в процессе старения при температуре  $140\text{ }^\circ\text{C}$ .

Удельное объемное сопротивление материалов в процессе сорбции пластовой жидкости снижается до установившегося значения  $\rho_\infty$ . Энергия активации снижается, она практически независима от температуры при  $\rho \rightarrow \rho_\infty$ . Среднее значение энергии активации электропроводности для образцов СПЭ 02-МК, состаренных при  $T_{ст} = 120^\circ\text{C}$  в течение 303 часов, составило  $W = 64 \text{ Кдж/моль}$  (табл.).

В температурном ходе удельное сопротивление диэлектриков изменяется по экспоненциальному закону:

$$\rho(T) = \rho_H \cdot \exp\left[-\frac{W}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T}\right)\right]. \quad (9)$$

Согласно приведенному уравнению был сделан расчет температурной зависимости  $\lg\rho$  блоксополимера, предварительно состаренного при температуре  $120^\circ\text{C}$  в течение 300 часов (рис. 6). В области температур  $100\text{--}120^\circ\text{C}$  экспериментальные и расчетные данные совпадают, а вблизи комнатной температуры различие в значениях  $\lg\rho$  составляет  $2\text{--}3\%$ .

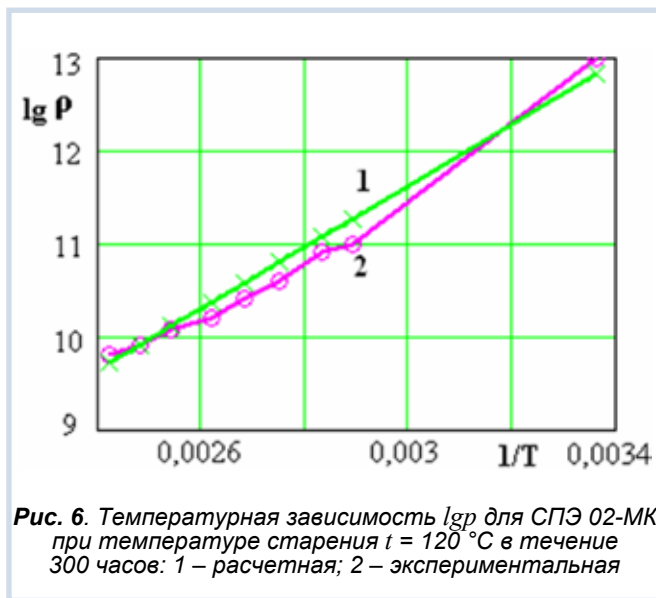


Рис. 6. Температурная зависимость  $\lg\rho$  для СПЭ 02-МК при температуре старения  $t = 120^\circ\text{C}$  в течение 300 часов: 1 – расчетная; 2 – экспериментальная

Экспериментальная зависимость  $\lg\rho$  от времени старения образцов блоксополимера СПЭ 02-МК в пластовой жидкости при рабочей температуре  $T_p = 120^\circ\text{C}$  приведена на рис. 7. Измерение сопротивления образцов производилось как при температуре старения, так и после их охлаждения до  $T_H = 20^\circ\text{C}$ . После достижения равновесного поглощения пластовой жидкости вследствие процессов деструкции материала наблюдается монотонное снижение диэлектрических свойств изоляции. Скорость процессов деструкции ( $B$ ) можно рассчитать как тангенс угла наклона зависимости  $\lg\rho$  от времени старения при температуре эксплуатации.

$$B = \operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta \lg \rho}{\Delta t}. \quad (10)$$

Принимая во внимание уравнения (9) и (10), можно произвести расчет величины удельного сопротивления изоляции при температуре эксплуатации для любого времени наработки  $t$ :

$$\rho(tT) = \frac{\rho_H}{1 + \left(\frac{\rho_H}{\rho_\infty} - 1\right) \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right)} \cdot \exp\left[-\frac{W}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T_P}\right) - B \cdot (t - \tau)\right], \quad (11)$$

$$\lg \rho(tT) = \lg \frac{\rho_H}{1 + \left(\frac{\rho_H}{\rho_\infty} - 1\right) \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right)} - \left[\frac{W}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T_P}\right) + 0,43 + B \cdot (t - \tau)\right]. \quad (11a)$$

Расчетное значение постоянной времени сорбции пластовой жидкости ( $\tau$ ) при толщине изоляции из блоксополимера  $\delta = 2,5 \text{ мм}$  и температуре  $T_p = 120^\circ\text{C}$  составляет 250 часов. Если время старения ( $t$ ) значительно превышает ( $\tau$ ), то уравнение (11) принимает более простой вид:

$$\rho(tT) = \rho_\infty \cdot \exp\left[\frac{W}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T_P}\right) - B \cdot t\right]. \quad (12)$$

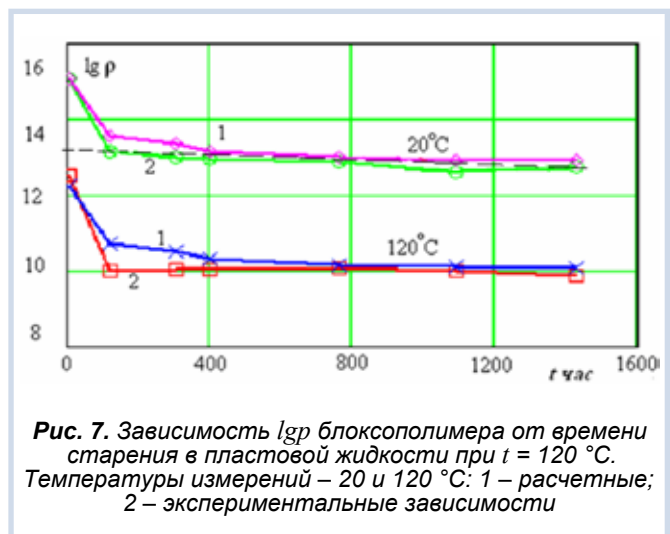


Рис. 7. Зависимость  $\lg\rho$  блоксополимера от времени старения в пластовой жидкости при  $t = 120^\circ\text{C}$ . Температуры измерений –  $20$  и  $120^\circ\text{C}$ : 1 – расчетные; 2 – экспериментальные зависимости

Установившееся значение удельного сопротивления ( $\lg\rho_\infty$ ) определялось экспериментально путем экстраполяции линейной части временной зависимости к оси ординат (рис. 7).

Определив таким образом закономерности изменения удельного сопротивления изоляционного материала, можно рассчитать сопротивление изоляции жилы кабеля как при температуре эксплуатации,

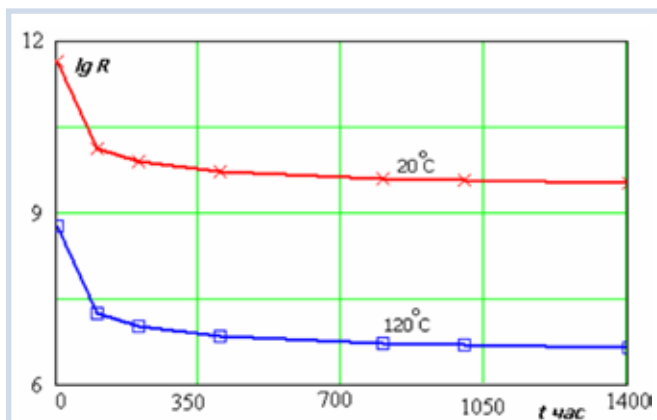
так и для любой другой температуры. Расчет сопротивления изоляции для кабеля марки КП<sub>п</sub>БП проводился по формуле:

$$R = \rho_H \cdot \frac{\ln D/d}{2 \cdot \pi \cdot l}, \quad (13)$$

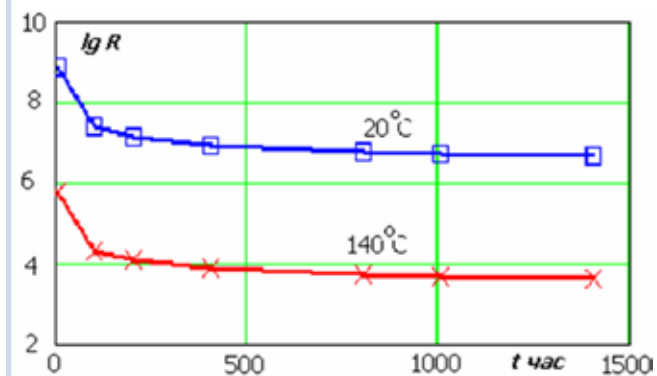
где  $D$  – диаметр по изоляции,  $m$ ;  $d$  – диаметр по жиле,  $m$ ;  $l$  – расчетная длина кабеля.

В соответствии с ГОСТ Р51777–2001 (Кабели для установок погружных электронасосов) сопротивление для пластмассовой изоляции на 1 км кабеля при 20 °С должно быть не менее  $2,5 \times 10^9$  Ом, для резиновой изоляции – не менее  $5 \times 10^8$  Ом. Как следует из расчетных данных, для изоляции из блоксополимера минимальное значение  $R_x$  достигается уже через 2000 часов эксплуатации при температуре 120 °С, а для изоляции из ЭПР при 140 °С – через 10–20 часов, что свидетельствует о слишком высокой рабочей температуре, выбранной для ЭПР.

Рекомендованные стандартом допустимые значения сопротивления изоляции приводятся для нормальных условий. Повышение температуры до 100–120 °С вызывает уменьшение сопротивления на 2–3 порядка (рис. 7–9). Ресурс изоляции определяется рядом факторов, и в первую очередь составом агрессивной среды и ее температурой. В условиях эксплуатации при температуре 120 °С сопротивление изоляции на 1 км длины кабеля марки КП<sub>п</sub>БП составляет несколько  $Mom$  (рис. 8). Через 20 000 часов наработки оно уменьшится до  $2 \times 10^4$  Ом/км (11). Для того чтобы определить остаточный ресурс изоляции, необходимо разработать критерии признаков дефектов, их пороговые количественные значения исправной, дефектной (но работающей) и аварийной (требующей замены) изоляции кабеля [1]. Таким критерием может служить величина сопротивления изоляции на единицу длины кабеля. Для этого нужно периодически производить ее измерение в условиях эксплуатации, то есть определять фактическое состояние изоляционной системы и для данных условий работы рассчитывать скорость деградации изоляции. Этот параметр учитывает также снижение срока службы кабелей для питания погружных электронасосов добычи нефти за счет многократных спусков-подъемов их из скважины и кратковременные перегревы изоляции, доходящие до 40–50 °С (8). Оперативная информация о состоянии изоляционной системы позволит обслуживающему персоналу принимать необходимые меры по предотвращению выхода из строя кабельного изделия.



**Рис. 8.** Расчетные значения временных зависимостей сопротивления изоляции кабеля из СПЭ 02-МК на длине 1 км ( $t = 120$  °С,  $D_{из} = 9,84$  мм,  $d_{ж} = 4,5$  мм),  $t_{uzm} = 20$  и 120 °С



**Рис. 9.** Расчетные значения временных зависимостей сопротивления изоляции кабеля из ЭПР на длине 1 км ( $t = 140$  °С,  $D_{из} = 8,4$  мм,  $d_{ж} = 4,5$  мм)

#### ЛИТЕРАТУРА



1. Лавров Ю. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Особенности проектирования и эксплуатации // Новости электротехники. 2007. № 1. С. 72–75.
2. Сафонов Г.П., Воробьев П.В., Сорокин А.М., Булдаков А.В. Продление ресурса систем изоляции за счет использования химических активных компонентов // Электротехника. 2007. № 3. С. 51–55.
3. Сафонов Г.П., Гринь Е.Л., Сорокин А.М., Булдаков А.В., Воробьев П.В. Диагностика состояния систем электрической изоляции // Электротехника. 2007. № 3.
4. Рейтлингер С.А. Проницаемость полимерных материалов. М.: Химия, 1974. С. 272.
5. Маслов В.В. Влагостойкость электрической изоляции. М.: Энергия, 1973. С. 208.
6. Михайлов М.М. Влагопроницаемость органических диэлектриков. М.; Л.: ГЭИ, 1960. С. 163.
7. Борисов Б.И., Моцанский Н.А. Диффузия агрессивных сред через полимерные материалы // Пластические массы. 1963. № 3.
8. Месенжчик Я.З., Осягин А.А. Силовые кабельные линии для погружных электросистем. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 240.