

При реализации нагрева воды в индукционных системах проточного типа пароводяная смесь имеет сложную структуру, включающую пузыри размерами от долей миллиметра до миллиметра с последующим исчезновением после взаимодействия с менее нагретыми объемами воды. Кроме этого, температура воды и, следовательно, паросодержание в пароводяной смеси изменяется от входа потока воды в установку до ее выхода. Для таких сложных структур определять электропроводность пароводяной смеси можно только экспериментальным путем.

Пароводяная смесь и вода относятся к слабопроводящим (полупроводниковым) веществам и характеризуются ионной электропроводностью за счет диссоциации самой жидкости (собственная электропроводность) и примесей (примесная электропроводность). Удельное электрическое сопротивление воды и пароводяной смеси может изменяться в диапазоне от $5 \dots 10^3$ до $4 \dots 10^5$ Ом·м в зависимости от содержания

солей и пара. Поэтому интенсивность взаимодействия воды с электромагнитными полями будет менее ярко выражена, чем с электропроводными металлами. Однако экспериментально установлено, что локальное взаимодействие силового электродинамического поля и напряженностей электромагнитного поля на область насыщенных растворов при нагреве воды существенно увеличивает скорости образования нерастворимых в воде солей и, тем самым, обеспечивает снижение ее жесткости в индукционных системах нагрева.

В электротехнологиях практически не рассматривались электродинамические процессы в воде и других жидкостях с ионной электропроводностью, находящихся в электромагнитных полях индукционных систем нагрева. В связи с этим в настоящее время созданы экспериментальные установки, в которых повышение технологической эффективности осуществляется за счет интенсификации электродиффузии в рассматриваемых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чердниченко В.С. Индукционные нагреватели с электромагнитными экранами // Электричество. 1970, № 2. С. 40-44.
2. Чердниченко В.С. Расчет потерь энергии в кожухе индукционных электропечей // Электротермия. М.: Информэлектро, 1967. Вып. 98. С. 7-8.
3. Cherednichenko V.S., Ivlikov S.U., Inkin A.I. Calculation of induction heating system with coaxial cylinders design / Proceeding of the international seminar on Heating by Internal Sources. September 12-14, 2001. Padua (Italy): Servizi Grafici Editoriali, 2001. P. 481-486.
4. Хацевский К.В. Электронагрев жидкостей и газов в индукционных установках с коаксиальными цилиндрами. Павлодар: ЭКО, 2002.
5. Чердниченко В.С., Новиков Ю.П. Расчет тарельчатого аппарата для разделения и очистки металлов возгонкой в вакууме // Вакуумные процессы в цветной металлургии. Алма-Ата: Наука, 1971. С. 95-100.
6. Maxwell J.C. A treatise on Electricity and magnetism, Edition, Oxford Univ. Press, 1891.

УДК 621.315.616.9039.83

БЕНМАГАМБЕТОВА К.Х.

Высоковольтные кабели с изоляцией из полиимидных пленок

1 Изоляция высоковольтных кабелей
Электрическая изоляция силовых кабелей служит для изолирования токопроводящей жилы от жил других фаз и другого напряжения и заземленных оболочек кабеля. Радиальные размеры высоковольтных кабелей в значительной степени определяются толщиной изоляции. В целях уменьшения габаритных размеров и стоимостей кабелей выбирают достаточно высокие рабочие напряженности в электрической изоляции. В силовых кабелях широко применяются бумажно-масляная изоляция и изоляция из полиэтилена, поливинилхлоридного кабельного пластика, резины [1].

Широкое применение в кабелях находят полимерные материалы. Накладываемая экструзией на токопроводящую жилу полимерная изоляция не требует дорогостоящей свинцовой или алюминиевой оболочки. Наибольшее распространение в кабелях высокого напряжения получил полиэтилен. Полиэтилен имеет низкий $\tan \delta$ и небольшую относительную диэлектрическую проницаемость. Кратковременная электрическая прочность полиэтилена достигает в небольших толщинах 300-500 МВ/м. Однако при длительном приложении напряжения в полиэтилене развиваются ден-

дриты, завершающиеся пробоем изоляции. Дендриты развиваются от местных неоднородностей и загрязнений полиэтилена. Поэтому для увеличения долговечности изоляции кабеля полиэтилен необходимо тщательно очищать. Высокий температурный коэффициент линейного расширения полиэтилена ($0,00015-0,00018$ °C⁻¹) приводит к появлению в полиэтилене высоких механических напряжений при смене температуры, что вызывает снижение срока службы изоляции [1].

В настоящее время полиэтилен применяется в кабелях на напряжение до 220 кВ, а с изоляцией из сшитого полиэтилена до 500 кВ. В целях повышения нагревостойкости полиэтилен подвергают сшиванию, при котором линейная структура переходит в пространственную. Сшивание полиэтилена осуществляется либо его облучением электронами или γ -лучами, либо химическим путем. Радиационное сшивание полиэтилена дает более высокое качество материала, так как при этом не вносятся никаких добавок. Химическое сшивание полиэтилена осуществляется путем введения в него перекисных соединений, которые несколько снижают его электроизоляционные свойства.

Поливинилхлоридный пластикат имеет повышенный $\text{tg}\delta$, что ограничивает его применение из-за тепловой неустойчивости кабелей при высоком напряжении, обусловленное высокими диэлектрическими потерями. Поэтому кабели на основе поливинилхлоридного пластиката изготавливают на напряжение до 10 кВ.

Кабели с резиновой изоляцией для стационарной прокладки применяют на напряжение до 35 кВ. Основным недостатком резиновой изоляции является ее сравнительно быстрое старение, приводящее к перестройке структуры каучука и вызывающее отказ кабеля.

Бумажно-масляная изоляция применяется в кабелях практически на все напряжения. Существенным достоинством бумажно-масляной изоляции являются ее не высокая стоимость и большая долговечность. Толщина кабельной бумаги от 80 до 170 мкм. Недостатки бумажно-масляной изоляции: высокий $\text{tg}\delta$, повышенные требования к качеству изготовления кабелей, потребность к герметичной металлической защитной (свинцовой или алюминиевой) оболочке. Повышение значения $\text{tg}\delta$ требует применения в кабелях на напряжение 500 кВ и выше форсированного охлаждения. С целью снижения $\text{tg}\delta$ ведутся работы по использованию в кабелях неполярных полимерных пленок, к таким относятся полиимидные слабополярные пленки.

2. Применение полиимидных пленок ароматического строения в высоковольтных кабелях и проводах

Основная область применения полиимидных пленок – электрическая изоляция кабелей и проводов, пазовая и межфазная изоляция в электрических машинах. Конструкция авиационного кабеля с изоляцией из пленки Kapton – F. Пленка Kapton – F – комбинированная, с одно- или двухсторонним покрытием фторопластом Teflon FEP (сополимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом; в РК известен под маркой фторопласт-4 МД). Это покрытие придает пленке способность свариваться с такой же пленкой и другими материалами. Кроме того, оно увеличивает химическую стойкость, а также повышает термоокислительную стабильность. Металлическая жила обертывается двумя слоями полиимидно-фторопластовой ленты Kapton – F марок F029 и F616, которые имеют толщину фторопластового покрытия 12,5 мкм и 2,5 мкм соответственно. Намотка каждого слоя производится в противоположных направлениях по спирали, с 50 %-м перекрытием. При нагревании слой фторопласта плавится и прочно соединяет ленты с образованием однородного покрытия. Внешняя оболочка изготавливается из фторопласта или полиимида (в последнем случае значительно возрастает сопротивление изоляции продавливанию) [2].

За счет высокой прочности и термостабильности полиимидной пленки можно снизить толщину изоляции в 2-3 раза по сравнению с изоляцией из двух материалов. Это дает экономию до 25, а по размерам – до 50 %. Преимущество по габаритам проводов с пленочной полиимидной изоляцией хорошо видно при сопоставлении его с кабелем того же сечения, изоляция которого выполнена из сшивающихся карбоцеп-

ных полимеров поливинилиденхлорида и полиолефина методом экструзии. Срок службы кабелей с изоляцией Kapton – F при 250 °С превышает 2000 ч, а при 275 °С – более 600 ч. Благодаря многослойности изоляции увеличивается ее надежность. Большим достоинством кабелей с полиимидной изоляцией является их негорючесть. Внесенный в пламя газовой горелки кабель обугливается лишь в месте, омываемом пламенем; дальше горение не распространяется.

В РФ освоен промышленный выпуск комбинированной полиимидно-фторопластовой пленки на основе пленки ПМ с односторонним (ПМФ-351) и двухсторонним (ПМФ-352) покрытием из фторопласта-4 МД. Эти пленки сохраняют на высоком уровне механические и электроизоляционные характеристики в интервале температур от –60 до +200 °С, обладают повышенными химической и влагостойкостью и способностью образовывать прочный сварной шов при сварке Ф-4 МД + Ф-4 МД, например, двухсторонней пленки.

Пленка ПМФ выпускается трех марок: С, А и Б – с толщиной полиимидной основы 40 и 60 мкм и толщиной фторопластового покрытия 10 мкм. Возможен выпуск пленки с толщиной полиимидной основы 30 мкм и толщиной фторопластового покрытия 5 мкм. При разработке кабелей с изоляцией на основе полиимидно-фторопластовых пленок, удовлетворяющих требованиям эксплуатации высоковольтных кабелей, необходимо обеспечить следующие условия:

– герметизацию и монолитность изоляции, за счет чего достигаются высокие значения физико-механических и электрических параметров;

– хорошую адгезию изоляции к жиле, что в сочетании с первым требованием должно гарантировать высокую эластичность изоляции и стойкость к многократным перегибам в процессе прокладки кабеля;

– адгезионную способность поверхностного слоя изоляции к пропитывающим или цементирующим составам, применяемым при изготовлении кабелей.

Указанные проблемы могут быть решены применением в конструкции изоляции как двухсторонних, так и односторонних полиимидно-фторопластовых пленок и обеспечением надежной сварки этих пленок между собой в процессе термообработки при изготовлении кабеля. При этом двухсторонняя пленка накладывается непосредственно на жилу, а односторонняя – в наружном слое изоляции фторопластом внутрь, полиимидом наружу. За счет фторопластового покрытия обеспечиваются сваривание пленок между собой и адгезия к жиле, а поверхность изоляции кабеля из чистого полиимида позволяет накладывать внешнюю полимерную оболочку из таких материалов, как поливинилиденфторид, фторопласт методом экструзии.

В таблице 1 представлены основные технические характеристики пленки ПМ толщиной 40 мкм, односторонней ПМФ-351С и двухсторонней ПМФ-352С пленок с толщиной полиимидной основы 40 мкм.

При изготовлении высоковольтных проводов, а не кабелей, марки ППИ-У с применением пленок марки ПМФ-С производства России, выполненных на основе пиромеллитового диангидрида, т.е. полипиромелитимидных пленок, номинальная толщина изоляции со-

ставляет 0,23 мм. При этом толщина полиимидной основы пленки ПМФ-С равна 40 мкм при общей толщине двухсторонней пленки 60 мкм и односторонней 50 мкм. При изготовлении таких же проводов, но из пленки Каптон – F толщина изоляции составила 0,225 мм. Различие в конструкции объясняется толщиной пленки Каптон – F, которая составляет 25 мкм при общей толщине двухсторонней пленки 50 мкм и односторонней 38 мкм. Как уже указывалось ранее, выше-названные полиимиды относятся к группе ароматических полиимидов.

3. Применение полиимидных пленок алициклического строения в высоковольтных кабелях и проводах

Аналогичным образом возможен расчет изоляции кабеля из разработанного полиимида алициклического строения марки ПИФ_{АВ} [3, 4], электромеханические характеристики которого не уступают, а иногда и превосходят характеристики полиимидов ароматического строения. Так, например, толщину полиимидной основы можно формовать до 200 мкм. Оптимальной толщиной основы считается 150-160 мкм. В данном случае для расчета берем толщину полиимидной основы, равной 160 мкм, и по 10 мкм с двух сторон покрытие из фторопласта.

Толщина изоляции кабелей на высокие напряжения находится из условия, чтобы ее пробивное напряжение было выше наибольшего действующего в эксплуатации. Существенное значение имеет выбор рабочей напряженности в изоляции кабеля. Максимальную рабочую напряженность поля получим по формуле

$$E_{\text{раб}} = \frac{E_{\text{нр}}}{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5} \quad (1)$$

Электрическая прочность $E_{\text{нр}}$ определяется на основе экспериментов как среднее значение и зависит от толщины листов пленки, времени приложения напряжения и других факторов. Электрическая прочность полимерной изоляции уменьшается с увеличением ее толщины, площади электродов, температуры и экспозиции напряжения. С повышением толщины пленки $E_{\text{нр}}$ как на переменном, так и на импульсном напряжении снижается. Так, например, для полиимида алициклического строения при толщинах 140 мкм и 200 мкм на переменном напряжении $E_{\text{нр}}$ снижается от 220 до 180 кВ/мм соответственно. При толщине 160 мкм $E_{\text{нр}}$ составляет 200 кВ/мм.

Коэффициент k_1 учитывает наибольшее повышение рабочего напряжение в кабельной сети, так, при классе напряжений 35-220 кВ k_1 равен 1,15.

Коэффициент k_2 учитывает возможную кратность перенапряжений в электрических системах. Аппараты защиты в зависимости от класса напряжения имеют различный уровень срабатывания. Поэтому коэффициент k_2 зависит от класса напряжений: при классах напряжения от 3 до 500 кВ коэффициент k_2 находится в пределах от 5, до 2,5. Для напряжения 220 кВ $k_2 = 3$.

Коэффициент k_3 учитывает разброс электрических прочностей твердой изоляции, а также допустимые технологические отклонения ее размеров и принимается равным 1,3 – 1,5.

Коэффициент k_4 учитывает снижение электрической прочности при длительном приложении напряжения. Скорость снижения электрической прочности со временем зависит от вида применяемого электроизоляционного материала. Так, для полимерного материала можно принять $k_4 = 1,2$.

Таблица 1 – Технические характеристики полиимидных пленок [2, 3]

Характеристики		Марка пленки				
		ПИФ _{АВ}	ПМ	ПМФ-351С	ПМФ-352С	
1	Толщина и допускаемые отклонения, мкм	160±4	40±4	50±6	60±7	
2	Прочность при разрыве в продольном направлении, МПа, при температуре:	15-35 °С	185	177	88	78
		200 °С	–	–	64	49
3	Относительное удлинение при разрыве в продольном направлении, %, при температуре:	15-35 °С	55	40	70	75
		200 °С	–	–	60	60
4	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре:	15-35 °С	1·10 ¹⁶	1·10 ¹⁴	1·10 ¹⁴	1·10 ¹⁴
		200 °С	1·10 ¹⁵	1·10 ¹⁴	1·10 ¹⁴	1·10 ¹⁴
5	Электрическая прочность при частоте 50 Гц, МВ/м, при температуре:	15-35 °С	180-200	180	160	160
		200 °С	–	–	120	120
6	Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ⁶ Гц	2,2-3,5-4,7	–	2,7	2,7	
7	Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10 ⁶ Гц	2·10 ⁻³	–	6·10 ⁻³	6·10 ⁻³	
8	Адгезионная прочность сварного соединения, Н/м, при сварке фторопласт + фторопласт	200	–	245	245	
9	Плотность, г/см ³	1,47	1,42	1,55	1,63	

Коэффициент k_5 учитывает снижение E_{np} изоляции под другими факторами, такими как давление, влажность, действие агрессивных сред и т.д. и принимается равным 1,1 – 1,2. Общий коэффициент запаса в зависимости от вида изоляции и класса напряжения находится в пределах от 32 до 5 [1], для рассматриваемого случая коэффициент получился равным 7,5-8, выбрали 8.

С учетом всех коэффициентов, а также класса напряжения (220 кВ) и электрической прочности, равной 200 кВ/мм для полиимидной пленки толщиной в 160 мкм, $E_{раб}$ получается равным 25 кВ/мм.

В большинстве случаев важны максимальная E_{max} и минимальная E_{min} величины напряженности электрического поля.

Выбрав рабочую напряженность поля, определим внешний радиус изоляции по соотношению

$$R_2 = R_1 \exp \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} E_{раб} R_1}, \quad (2)$$

где R_2 и R_1 – внутренний и внешний радиусы изоляции;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение кабельной линии.

Внутренний радиус изоляции равен внешнему радиусу полупроводящего экрана по токопроводящей жиле. Полупроводящий экран или слой полупроводящего покрытия токопроводящей жилы применяется для уменьшения влияния проводочности и исключения частичных разрядов между жилой и изоляцией. Материал полупроводящего экрана должен иметь хорошую адгезию к изоляции, а температурные коэффициенты расширения экрана и изоляции должны быть равны. Полупроводящий материал получают путем введения в него мелкодисперсной сажи. Толщину полупроводящего экрана принимают в пределах 0,2 – 0,8 мм в зависимости от технологии ее наложения. Для рассматриваемого случая толщина полупроводящего полиимида алициклического строения равна 0,2 мм. Формула (2) применяется для расчета негра-

дированной изоляции с круглыми жилами. Рассчитанный по данной формуле внешний радиус по изоляции для жилы радиусом 5 мм равен 13,8 мм. Толщина изоляции в этом случае равна 6,6 мм.

Толщина изоляции кабелей с полимерной изоляцией можно определить и по формуле

$$\Delta_{из} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} E_{раб,сп}}. \quad (3)$$

Рассчитанная по данной методике толщина алициклической полиимидной изоляции кабеля получается равной 5 мм. С учетом коэффициента запаса принимаем толщину, равную 6,6 мм. При радиусе жилы 15 мм внешний радиус по изоляции получился равным 21,24 мм, соответственно, толщина изоляции равна 6 мм. С увеличением сечения жилы толщина изоляции уменьшается и это закономерно.

Для данного класса напряжения (220 кВ) при применении, например, бумажно-масляной изоляции толщина изоляции при радиусе жилы 5 мм равна 58,5 мм, а при радиусе жилы 15 мм толщина равна 20 мм. Из этого видно, что применение полиимидной пленочной изоляции ПИФ_{АБ} дает возможность снизить толщину в 4-10 раз по сравнению с бумажно-масляной изоляцией.

Выводы

1. Изоляция из полиимидных пленок ПИФ_{АБ} по электрическим и механическим характеристикам не уступает существующей полиимидной изоляции ароматического строения и может быть использована при проектировании и производстве высоковольтных электрических кабелей.

2. Применение полиимидной пленочной изоляции ПИФ_{АБ} дает возможность снизить толщину в 4-10 раз по сравнению с бумажно-масляной изоляцией.

3. Применение изоляции на основе пленок ПИФ_{АБ} позволяет существенным образом повысить технико-экономические характеристики современных кабелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции. М.: Энергоиздат. 1981. 392 с.
2. Жубанов Б.А., Кравцова В.Д., Бекмагамбетова К.Х. Новые полимерные системы на основе алициклических полиимидов // Журнал прикладной химии. РФ. М.: 2006. Т. 79. Вып 11. С. 1890-1891.
3. Гнедин А.А., Мещанов Г.И. Обмоточные провода с пленочной изоляцией // Электротехн. пром-сть. Сер. 19. Кабельные изделия. Обзор. иформ. 1987. Вып. 2 (7). 67 с.
4. Жубанов Б.А., Бекмагамбетова К.Х., Кравцова В.Д., Пленки из алициклических полиимидов и их основные электрические свойства // Химический журнал Казахстана. Алматы. 2009. №3. С. 68-91.

УДК 658.26

**САГИТОВ П.М.,
САДЫБЕК А.Т.**

Подтверждение соответствия качества электрической энергии и защита прав потребителей

Для обеспечения защиты интересов потребителей в вопросах качества электрической энергии, устранения технических барьеров в торговле, обеспечения конкурентоспособности электрической энергии на внутреннем и внешнем рынках и создания необходимых условий для деятельности физических и юридических лиц на едином товарном рынке Казахстана, а

также для участия в международном экономическом, научно-техническом сотрудничестве и международной торговле назрела необходимость разработки организационно – технических и правовых основ подтверждения соответствия качества электрической энергии в Казахстане.

В Республике Казахстан приняты законы «О тех-