

Д.А. Курашов, директор ООО «Электротехническая корпорация «Энергокомплекс»;
В.Г. Савченко, директор по техническому развитию ОАО «Камкабель»;
В.К. Барсуков, технический директор ООО «НПК «Энергия»;
Е.В. Барсуков, канд. техн. наук, заместитель технического директора ООО «НПК «Энергия» по науке и производству;
Н.П. Кадочников, заместитель технического директора ООО «НПК «Энергия» по качеству;
Е.В. Макарова, начальник химической лаборатории ООО «НПК «Энергия»

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ПРОПИТАННОЙ БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Для интенсивно развивающейся экономики и промышленности России с ее протяженностью и разнообразием климатических условий и рельефа, а также наличием большого количества энергоемких производств, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой нефти, газа, каменного угля и других полезных ископаемых, требуется большое количество разнообразных силовых кабелей, в том числе кабелей с пропитанной бумажной изоляцией (ПБИ), предназначенных для передачи и распределения электрической энергии.

Силовые кабели с ПБИ до настоящего времени являются самыми востребованными. Доля этих кабелей в общем объеме производства всех силовых кабелей в России составляет более 50 %. Столь широкое и длительное применение силовых кабелей с ПБИ обусловлено тем, что эта изоляция химически стабильна, стойка к воздействию электрических полей, может длительно работать при повышенных температурах, имеет высокую электрическую прочность. Надежность силовых кабелей с ПБИ проверена временем.

Дальнейшее развитие и совершенствование кабелей с ПБИ связано с повышением их качества, технологичности, надежности и долговечности, улучшением эксплуатационных характеристик, в частности, повышением рабочей температуры жил и снижением себестоимости. В 2002 г. в ООО «НПК «Энергия» (г. Пермь) совместно с ОАО «Камкабель» была составлена комплексная программа по модернизации силовых кабелей с ПБИ, замене старых материалов на новые, более качественные и недорогие. В программу были внесены практически все неметаллические материалы кабеля: бумага для фазной и поясной изоляции, бумага для заполнения свободного пространства меж-

ду изолированными жилами, бумага сигнальная и маркированная, бумага электропроводящая для экранирования изоляции, загуститель диэлектрических пропиточных составов, пропитанная кабельная пряжа, тканевая лента и негорючий морозостойкий битум для защитных покровов.

Для изготовления пропитанной бумажной изоляции в настоящее время используется многослойная кабельная бумага марок К и КМ по ГОСТ 23436–91 из сульфатной небеленой целлюлозы. Бумага марок К и КМ имеет существенные недостатки: повышенную жесткость и обрывность, пониженные показатели относительного удлинения и энергии разрыва в машинном направлении. С целью исключения поперечных и продольных надрывов, карманов и трещин бумажных лент в кабеле, улучшения технологии наложения и пропитки бумажной изоляции, улучшения эксплуатационных характеристик и снижения себестоимости кабеля предложено использовать в изоляции силовых кабелей бумагу-основу кабельную микрокрепированную марки БКМ по ТУ 5433-004-50289046–2003 из 100 % хвойной сульфатной целлюлозы. Основные характеристики микрокрепированной бумаги БКМ приведены в табл. 1. Микрокрепированная бумага отличается от обычной крепированной очень мелким крепом, незаметным для невооруженного глаза. Эту бумагу в отличие от крепированной невозможно растянуть руками. Крепирование бумаги осуществляется в сушильной части бумагоделательной машины с использованием «бесконечной» резиновой ленты или обрешиненного вала. Микроскладки на бумажном полотне образуются за счет разницы скоростей металлического и обрешиненного валов, между которыми проходит полотно, усилия прижима валов и упругих свойств резины.

Таблица 1

Характеристики электроизоляционной кабельной бумаги

Наименование показателя	Условное обозначение бумаги				
	К-120	КМ-140	БКМ-130	БКМ-140	БКМ-150
Толщина, мкм	123	142	128	136	152
Плотность, г/см ³	0,79	0,78	0,72	0,75	0,68
Энергия разрыва, Дж/м ² :					
• в машинном направлении	115	160	330	400	320
• в поперечном направлении	180	240	280	300	270
Сопротивление раздиранью в поперечном направлении, Н	1,5	1,9	2,8	3,0	3,3
Удельная электропроводность водной вытяжки, мкСм/см	60	45	65	65	48
Массовая доля золы, %	1,00	0,6	0,8	0,8	0,6
Относительное удлинение в машинном направлении, %, не менее					
Относительное удлинение в поперечном направлении, %, не менее					

Преимущества в свойствах, которыми обладает микрокрепированная бумага, объясняются приданием волокнам повышенных упругопластических свойств и высокой гибкости за счет их предварительной деформации в процессе крепирования без разрушения структуры бумаги, как при макрокрепе. Одним из основных отличительных свойств микрокрепированной бумаги БКМ является повышенное относительное удлинение в машинном направлении, которое в 2–3 раза выше, чем у кабельной бумаги КМ. Микрокрепированная бумага в сравнении с кабельной некрепированной бумагой имеет пониженное разрушающее усилие в машинном направлении. Однако, благодаря высокой степени удлинения, на практике она оказывается лучшей, чем менее растяжимая кабельная бумага. Это обусловлено высокой динамической прочностью (энергией разрыва) микрокрепированной бумаги. Энергия разрыва \mathcal{E} является комплексным критерием механической прочности бумаги под действием сложной динамической нагрузки в процессе изготовления и испытания кабеля и определяется расчетным путем по формуле:

$$\mathcal{E} = K \times P \times L \text{ Дж/м}^2,$$

где $K = 0,41$ – коэффициент для машинного направления; $K = 0,48$ – коэффициент для поперечного направления; P – разрушающее усилие, H ; L – относительное удлинение, %.

Чем выше энергия разрыва, тем прочнее бумага. Энергия разрыва микрокрепированной бумаги БКМ-140 в машинном направлении в 2,5 раза выше, чем у кабельной бумаги КМ-140, поэтому бумага БКМ-140 способна выдерживать гораздо большие динамические и изгибающие нагрузки в составе кабеля.

Использование микрокрепированной бумаги в качестве фазной и поясной изоляции кабеля обеспечивает ровную и очень плотную намотку бумаги без образования складок и воздушных полостей в изоляции. Это способствует повышению электрической прочности и надежности бумажной изоляции. Одновременно исключаются надрывы и обрывные участки бумажных лент в процессе изолирования. Изолирование кабеля может проводиться на повышенных скоростях, без предварительного смачивания кружков бумаги водой. Микрокрепированная бумага марки БКМ имеет высокую стойкость к механическим повреждениям (порезам, проколам, сдирам), является влагостойкой и термостойкой, имеет небольшую стоимость, поэтому в наибольшей степени удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кабельной изоляции. После испытания кабеля на навивание установлено, что микрокрепированная изоляционная бумага не имеет механических повреждений, остается гибкой и эластичной после пропитки диэлектрическим составом во всех слоях фазной и поясной изоляции.

С целью улучшения условий пропитки диэлектрическими составами микрокрепированная бумага изготавливается с пониженной плотностью (0,68–0,75) г/см³. Понижение плотности бумаги позволяет снизить температуру сушки и пропитки на 10 ÷ 15 °С, полностью и качественно пропитывать бумажную изоляцию более вязкими нестекаемыми составами. При снижении температуры пропитки бумажная изоляция и диэлектрический состав в меньшей степени подвержены термоокислительным деструктивным процессам, что приводит к увеличению срока службы кабеля. Менее плотная бумага впитывает в себя большее количество пропиточного состава, у которого диэлектрические свойства существенно выше, чем у бумаги, поэтому кабель с пропитанной микрокрепированной бумагой пониженной плотности имеет более высокие диэлектрические характеристики изоляции. Микрокрепированная высокопористая поверхность бумаги способствует удержанию

вязкого диэлектрического состава от перетекания вдоль кабеля на наклонных участках трассы.

На основе микрокрепированной бумаги БКМ в НПК «Энергия» разработана сигнальная бумага БКМ-С для обозначения изолированных жил, маркированная бумага БКМ-М для обозначения кабеля и жил, двухцветная электропроводящая бумага БЭКДм для экранирования бумажной изоляции и бумажные жгуты для заполнения промежутков между изолированными жилами.

На новой сигнальной бумаге БКМ-С с одной стороны бумажного полотна нанесены полосы красного, или синего или зеленого цвета. На маркированной бумаге БКМ-М – цифровые и буквенные обозначения кабеля и жил. Сигнальные полосы и маркировка наносятся на бумагу БКМ методом флексографической печати с использованием экологически чистой масло-термостойкой водоэмульсионной флексокраски. Полосы и маркировка наносятся на бумагу равномерно и четко, не пропитывают ее насквозь и не теряют четкость и цвет после сушки и пропитки в масло-канифольном составе при температуре до 140 °С. После высыхания флексокраска не вымывается ни в масле, ни в воде.

В силовых кабелях с ПБИ по ГОСТ 18410–73 предусмотрен экран из одноцветной электропроводящей бумаги ЭКУ-120. Для придания электропроводности в композицию бумаги введен технический углерод на стадии размола целлюлозы. Расход технического углерода составляет ~20 % от массы целлюлозы. При этом в бумаге остается только 10 % углерода, а остальная его часть уходит в стоки. Недостатки бумаги ЭКУ-120: высокое содержание технического углерода, большая толщина электропроводящего слоя, высокое электрическое сопротивление, пониженная динамическая прочность и эластичность, пониженная стойкость к навиванию, пониженная технологичность, повышенный расход и повышенная стоимость. В процессе эксплуатации данной бумаги в составе кабеля происходит миграция технического углерода в изоляцию. Все эти недостатки бумаги ЭКУ-120 существенно снижают качество, надежность, технологичность и экономичность кабелей с ПБИ. Производство данной бумаги является экологически грязным из-за большого содержания углерода в сточных водах, в связи с этим выпуск электропроводящей бумаги марки ЭКУ-120 в РФ в настоящее время остановлен. Поэтому взамен бумаги ЭКУ-120 в России и странах СНГ используется финская одноцветная бумага TERKAB марки СВ-120. По составу бумага СВ-120 идентична бумаге ЭКУ-120, и имеет такие же недостатки.

При разработке новой электропроводящей бумаги марки БЭКДм в НПК «Энергия» были учтены все недостатки бумаги марок ЭКУ-120 и СВ-120, а также специальные требования к бумаге-основе и электропроводному покрытию.

Работы по созданию электропроводящей двухцветной бумаги марки БЭКДм, проведенные в 2003–2005 годы, завершились внедрением этой бумаги в серийное производство.

Электропроводящая бумага БЭКДм изготавливается путем нанесения на микрокрепированную бумагу БКМ электропроводного покрытия на основе технического углерода и полимерного связующего. В качестве технического углерода используется печная сажа и графит, а в качестве полимерного связующего – сополимеры эфиров акриловой и метакриловой кислот (полиакрилаты) и меламино-формальдегидная смола с добавками. Графит введен в состав электропроводного сажевого покрытия в качестве электропроводящей, антипригарной, антиадгезионной и антифрикционной добавки, существенно увеличивающей технологичность и качество бумаги БЭКДм и силового кабеля с пропитанной бумажной изоляцией. Электропроводящее покрытие в виде водной суспензии технического углерода и связующего наносит

Таблица 2

Характеристики электропроводящей кабельной бумаги

Наименование показателя	Условное обозначение электропроводящей бумаги			
	ЭКУ-120	СВ-120	БЭКДм-130	БЭКДм-150
Толщина бумаги, мкм	125	128	135	155
Толщина электропроводящего слоя, мкм	125	128	5	6
Плотность, г/см ³	1,00	1,05	0,75	0,72
Энергия разрыва, Дж/м ² :				
• в машинном направлении	90	160	300	360
• в поперечном направлении	12	230	260	300
Удельное электрическое сопротивление, кОм·м	70	50	—	—
Электрическое сопротивление, кОм	—	—	6	8

ся на бумагу-основу на бумаго-красильной машине «Yulhavaaga» (Финляндия) с воздушным шабером, который обеспечивает высокое качество покрытия малой толщины на неровной микрокрепированной поверхности бумаги-основы, а также исключает дефекты покрытия типа царапин. Бумага с нанесенным слоем суспензии поступает в сушильную камеру с температурой сушки до 110 °С для удаления влаги и полимеризации покрытия. Электропроводящее покрытие бумаги БЭКДм не вымывается в диэлектрических пропиточных составах МП-2, МП-5 и «Напелек» при пропитке кабеля, не выкрашивается при изгибах и не имеет адгезионного сцепления с металлической оболочкой кабеля. Основные характеристики бумаги БЭКДм приведены в табл. 2. Двухцветная электропроводящая бумага БЭКДм отличается от финской одноцветной бумаги СВ-120 большей эластичностью и энергией разрыва в машинном направлении, меньшим электрическим сопротивлением и толщиной электропроводящего слоя, экономией одного слоя изоляционной бумаги в поясной изоляции, уменьшением диаметра кабеля по изоляции и снижением расхода материалов на оболочку и защитные покровы.

Промежутки между изолированными жилами кабеля с ПБИ заполняются бумажными жгутами. Заполнение промежутков необходимо для устранения полостей, приводящих к преждевременному выходу из строя силового кабеля (пробою), для придания кабелю круглой формы, обеспечения равномерности электрического поля и увеличения электрической прочности изоляции. В кабелях по ГОСТ 18410–73 в качестве заполнителей промежутков между жилами используются жгуты из кабельной бумаги К или КМ толщиной 80 мкм. Недостатки жгутов из кабельной бумаги К и КМ:

- повышенная жесткость, обрывность и неравномерность заполнения промежутков между жилами;
- пониженная механическая прочность во влажном состоянии, недостаточная технологичность и невысокое качество.

Для устранения перечисленных недостатков предложено использовать в качестве заполнителей жгуты из микрокрепированной бумаги БКМ-100, характеристики которой приведены в табл. 3. Жгуты из микрокрепированной бумаги более ровные, прочные и эластичные. Раз-

рывная нагрузка жгута из бумаги БКМ-100 при влажности 20 % в 1,4 раза выше, чем из бумаги КМ-080. Жгуты из бумаги БКМ-100 равномерно и плотно заполняют промежутки между изолированными жилами кабеля без обрывов и пропусков (смещений).

Бумага из целлюлозных волокон становится надежным электроизоляционным материалом для силовых кабелей только после тщательной сушки и пропитки диэлектрическими составами (маслами, компаундами, синтетическими смолами), обладающими высоким электрическим сопротивлением и малыми диэлектрическими потерями.

Современные пропиточные составы для силовых кабелей с ПБИ подразделяются на два основных типа:

1. Вязкие составы, содержащие кабельное масло и загустители: очищенную канифоль, полиэтиленовый воск, сзвилен, полиизобутилен, синтетические смолы, с кинематической вязкостью при 70 °С не менее 170 мм²/с. Эти составы используются для кабелей, прокладываемых на горизонтальных и наклонных трассах с ограниченной разностью уровней.

2. Нестекающие пропиточные составы с температурой каплепадения не менее 90 °С, содержащие кабельное масло или полибутены и загустители: канифоль, полиэтиленовый воск, микрокристаллический воск (церезин). Данные составы используются для кабелей, прокладываемых на крутонаклонных и вертикальных трассах.

В настоящее время наибольшее распространение в кабельной промышленности получили вязкие пропиточные составы. Они более технологичны, имеют меньшую стоимость.

Известен пропиточный состав марки МП-2 для бумажной изоляции силовых кабелей по РД 16.14.491–86, содержащий кабельное масло КМ-22 в количестве 75,0 ± 3,0 мас. % и канифоль некристаллизующуюся модифицированную кабельную марки КНМК по ТУ 13-05-25–82, Россия, в количестве 25,0 ± 3,0 мас. %. Основные характеристики канифоли КНМК приведены в табл. 4. Состав МП-2 широко используется на кабельных заводах России. К недостаткам пропиточного состава МП-2 следует отнести значительное ухудшение его диэлектрических характеристик после старения при температуре 100 °С в тече-

Таблица 3

Характеристики электроизоляционной бумаги для жгутов

Наименование показателя	Условное обозначение бумаги		
	К-080	КМ-080	БКМ-100
Толщина, мкм	80	80	100
Плотность, г/см ³	0,78	0,76	0,70
Энергия разрыва, Дж/м ² :			
• в машинном направлении	60	75	230
• в поперечном направлении	100	120	230
Сопротивление раздиранью в поперечном направлении, Н	0,6	0,8	2,6

Таблица 4

Характеристики загустителей диэлектрических составов

Наименование показателя	Условное обозначение загустителя	
	КНМК	ЗПСКм
Внешний вид при нормальных условиях	твердые куски неопределенной формы массой до 1 кг коричневого цвета	светло желтые прозрачные гранулы без запаха
Температура размягчения, °С	70	100
Кислотное число, мг КОН/г	50 ÷ 100	0,5
Удельное объемное электрическое сопротивление при температуре 110 °С и напряжении 100 В, Ом·м	2,0·10 ¹⁰	5,0·10 ¹¹
Тангенс угла диэлектрических потерь при 100 °С, частоте 50 Гц и напряженности электрического поля 1 МВ/м	0,05	0,004
Класс опасности по ГОСТ 12.1.007–76	3 умеренноопасное вещество	4 малоопасное вещество

Таблица 5

Характеристики диэлектрических пропиточных составов

Наименование показателя	Условное обозначение пропиточного состава	
	МП-2	ПС-2
Вязкость кинематическая при 70 °С, мм ² /с: • до старения • после старения	180 192	185 179
Удельное объемное электрическое сопротивление при 100 °С и напряженности электрического поля 50 кВ/м, Ом·м: • до старения • после старения	4,4·10 ⁹ 2,6·10 ⁸	3,5·10 ¹⁰ 7,6·10 ⁹
Тангенс угла диэлектрических потерь при 100 °С, частоте 50 Гц и напряженности электрического поля 1 МВ/м: • до старения • после старения	0,037 0,593	0,004 0,014

ние 300 часов в присутствии меди или после многократной пропитки кабеля. Характеристики данного состава до и после старения приведены в табл. 5. Тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ состава МП-2 после старения увеличивается в 16 раз, а удельное объемное электрическое сопротивление ρ_v уменьшается в 17 раз. Ухудшение диэлектрических характеристик пропиточного состава МП-2 после старения обусловлено химической природой канифоли. Канифоль КНМК состоит в основном из смоляных кислот с кислотным числом не менее 50 мг КОН на 1 г продукта, которые частично окисляют кабельное масло, ухудшая его диэлектрические свойства. При этом окисляется не только кабельное масло, но и бумага, увеличивается осадок продуктов окисления в пропиточных котлах.

С целью устранения перечисленных недостатков состава МП-2 разработан новый пропиточный состав ПС-2 на основе кабельного масла КМ-22 в количестве 82,0 ± 2,0 мас. % и загустителя пропиточных составов кабельного марки ЗПСКм по ТУ 2451-008-50289046–2004, год ввода 2004, Россия, в количестве 18,0 ± 2,0 мас. %. Основные характеристики загустителя ЗПСКм приведены в табл. 4, пропиточного состава ПС-2 – в табл. 5.

Преимущества нового пропиточного состава в сравнении с составом МП-2:

- снижение $tg\delta$ до старения в 9 раз, после старения – в 40 раз;
- увеличение ρ_v до старения в 8 раз, после старения – в 30 раз;
- повышение стабильности диэлектрических и реологических характеристик при пропитке бумажной изоляции, а также диэлектрических характеристик кабеля;
- повышение технологичности;
- снижение стоимости.

Загуститель ЗПСКм представляет собой продукт термической полимеризации углеводородного сырья. Загуститель изготавливается в виде гранул. Температура начала термического разложения выше 200 °С. Загуститель ЗПСКм – химически нейтральный продукт, нетоксичный, полностью растворяется в кабельном масле, не содержит примеси и летучие вещества, является хорошим диэлектриком, существенно снижает старение состава ПС-2 и бумаги.

Новый загуститель может быть использован также в рецептуре нестекающих диэлектрических составов.

Научными партнерами НПК «Энергия» по разработке и испытанию новых материалов являются: Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности ОАО «ВНИИКП», Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Научно-исследовательский институт полимерных материалов ФГУП «НИИПМ» (г. Пермь), ОАО «Камкабель».

Выводы

1. Показаны преимущества новых изоляционных и электропроводящих материалов для силовых кабелей с ПБИ по сравнению с традиционными материалами.
2. Внедрение новых материалов позволяет существенно повысить качество и технологичность силовых кабелей с ПБИ, а также улучшить их эксплуатационные характеристики и снизить себестоимость.

Литература



1. Барсуков Е.В. Получение двухслойной кабельной бумаги с электропроводящим полимерным покрытием на основе древесной и джутовой целлюлоз. Канд. диссертация, 2005.

