

ПРОПИТОЧНЫЕ КОМПАУНДЫ

КЛАССА НАГРЕВОСТОЙКОСТИ Н-С

Маслов В.А., Гроздов А.Г., Панов А.А., Окнин Н.С.

Электротехника, 2009, № 11, С. 32-38

При разработке или изготовлении систем изоляции пропиточные компаунды выбирают, основываясь на их эксплуатационных и технологических свойствах. В первую очередь оценивается класс нагревостойкости компаунда, т.е. возможность длительной работы при определенной температуре, в частности по классу Н – 180°С и классу С – свыше 180°С. Класс нагревостойкости материалов определяется по изменению электрических (удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, электрическая прочность), механических (цементирующая способность), химических (потеря массы) свойств в процессе длительного старения при повышенных температурах.

В литературе [1-3] дана общая оценка электроизоляционных материалов - для хороших электроизоляционных материалов удельное объемное электрическое сопротивление должно составлять 10^{14} - 10^{16} Ом.м, а тангенс угла диэлектрических потерь не должен превышать 0,01. Соответственно, низкокачественные электроизоляционные материалы для электротехнических изделий неответственного исполнения могут иметь удельное объемное электрическое сопротивление 10^6 - 10^8 Ом.м, а тангенс угла диэлектрических потерь может превышать 0,1.

Диэлектрические потери это электрическая мощность, поглощенная в диэлектрике под действием приложенного к нему напряжения. Эта мощность рассеивается в изоляции, превращаясь в тепло. Величину диэлектрических потерь в диэлектрике, находящимся под воздействием переменного электрического поля, можно рассчитать по формуле [1]:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \quad \text{где:}$$

P – диэлектрические потери, Вт,

U – переменное напряжение, В,

ω – угловая частота, рад/с ($\omega = 2 \pi f$),

C – емкость изоляции, Ф,

$\operatorname{tg}\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь.

Таким образом при увеличении $\operatorname{tg}\delta$ пропорционально увеличивается поглощенная диэлектриком мощность. Если учесть, что с ростом температуры $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика существенно возрастает, то для каждого материала наступает момент по температуре, когда теплосъем с изоляции за счет какого-либо теплоносителя становится недостаточным для компенсации тепла, выделившегося в диэлектрике. С этого момента начинается автокаталитический процесс саморазогрева изоляции, который может и должен привести к тепловому пробую изоляции.

Тепловая мощность, отводимая от диэлектрика:

$$P = \lambda S (T_2 - T_1)/h \quad \text{где:}$$

P – количество отводимого тепла, Вт,

λ – удельная теплопроводность, Вт/м.К

T_2, T_1 – температуры диэлектрика и теплоносителя, °С

S – площадь диэлектрика, м²

h – толщина диэлектрика, м

Зависимость теплосъема носит практически линейный характер и определяется в основном разницей температур между электрической машиной и теплоносителем. Другие параметры (удельная теплопроводность, конфигурация) в реально рассматриваемом диапазоне температур остаются практически неизменными. В тоже время тепловыделение за счет диэлектрических потерь следует прямо за изменением $\operatorname{tg}\delta$ (Рис.1).

На тепловыделение изоляции существенное влияние оказывает приложенное к диэлектрику напряжение. Поскольку эта зависимость квадратичная, то при высоких напря

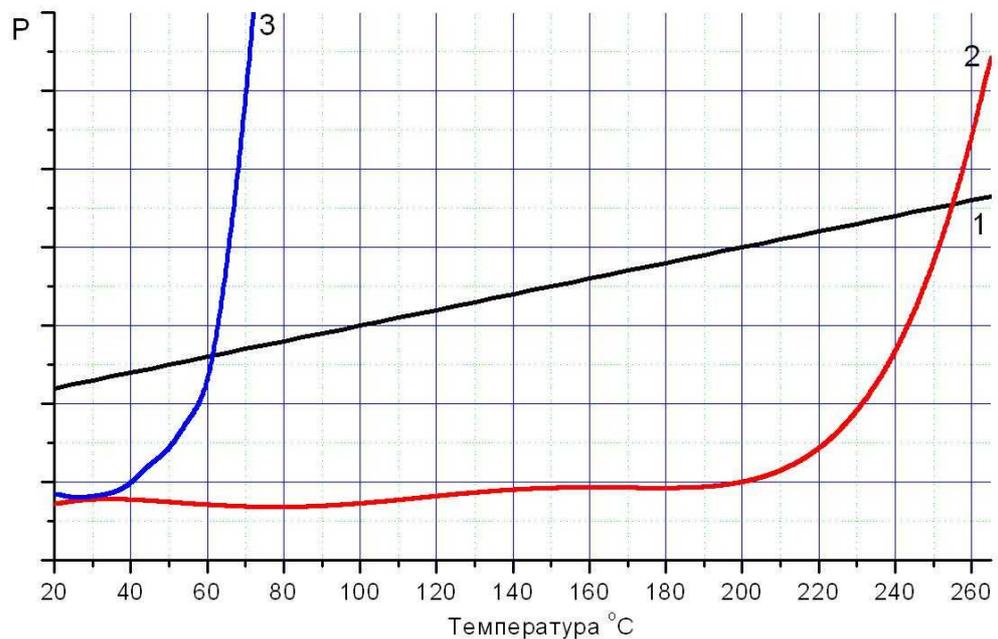


Рис.1. Расчетные зависимости диэлектрических потерь и отводимой тепловой мощности от температуры. 1 - Мощность теплоотведения; 2 – Мощность диэлектрических потерь для материала с $\text{tg}\delta = 0,1$ при $260\text{ }^\circ\text{C}$; 3 – Мощность диэлектрических потерь для материала с $\text{tg}\delta = 0,9$ при $120\text{ }^\circ\text{C}$;

жениях это может играть определяющую роль. Т.е. материалы с достаточно высоким $\text{tg}\delta$ при высоких температурах могут применяться в низковольтных машинах и ни в коем случае неприемлемо их использование для высоковольтных машин.

Применительно к высоковольтной изоляции очень важное значение для пропиточных компаундов имеет коэффициент усадки и совместимость с изоляционной основой. Малая величина коэффициента усадки (химическая и термическая составляющие) гарантируют малое количество пор в структуре изоляции, где доля компаунда составляет 25-35%. Это явление доказано на практике применения малоусадочных (<2%) эпоксидных компаундов. Малая усадка компаунда определяет низкие значения величин частичных разрядов и прироста тангенса угла диэлектрических потерь от напряжения, которыми обычно характеризуют монолитность изоляции.

Учитывая выше сказанное, мы попытались провести по возможности полный обзор пропиточных компаундов, делая акцент на их свойства при повышенных температурах.

На данный момент предлагается достаточно много компаундов с классами нагревостойкости Н-С, производящиеся в России и за рубежом. По химической природе это компаунды на основе олигоэфиримидов, модифицированных или нет активными разбавителями - стиролом или винилтолуолом, модифицированные эпоксидные составы, а также силиконовые компаунды.

В таблице 1 приведены характеристики некоторых пропиточных компаундов, производящихся в Западной Европе фирмами ALBESIANO SISA Италия, Von Roll Швейцария, ALTANA Electrical Insulation Германия. Данные для этой таблицы взяты из проспектов, представленных на специализированных выставках и в Интернете на сайтах фирм производителей [4-7]. Как видим, основной акцент при описании компаундов поставлен на технологические свойства компаундов – их вязкость и время желирования при определенной температуре. Эксплуатационные характеристики – электрическая прочность, удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь зачастую приведены только при комнатной температуре. При заявленных рабочих температурах этих показателей недостаточно. Однако для всех компаундов приведен либо класс нагревостойкости, либо термогравиметрический индекс (ТИ).

Более подробно представлены данные для пропиточных компаундов отечественного производства (табл.2). Однако и в этом случае данных по электрической прочности, удельному объемному электрическому сопротивлению и особенно по тангенсу угла диэлектрических потерь явно не хватает. Соответственно нельзя в полной мере оценить возможность применения компаундов для создания систем изоляции с повышенными требованиями при температурах 180°C и выше.

Прежде всего, обращаем внимание на то, что образцы для испытаний проходили термообработку по рекомендованному для каждого материала режиму.

Таблица 1. Характеристики пропиточных компаундов класса нагревостойкости Н-С зарубежного производства.

Марка материала, предприятие – изготовитель страна-изготовитель	DOLPHON ALBESIANO SISA Италия			DAMISOL Von Roll Швейцария				
	PDR 1962	CC1144/LV	CC1118/LV	3032	3037	3340	3551	2005 HFP
Наименование показателя								
Класс нагревостойкости/термогравиметрический индекс, °С	F-H		H	H	H	H	C	
Вязкость по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4мм при температуре (20±0,5)°С, с, не более	30-38 ВЗ-1	180-240	95-120 ВЗ-1	200-300 МПа.с	150-300 МПа.с	200-500 МПа.с	1300 МПа.с	70-90
Продолжительность желатинизации при температуре (150±2)°С, мин, не более	2-4	5-9 135°С	9-16 140°С	1,5-2 120°С	1,5-2 120°С	2-4 120°С	5-12 180°С	
Время жизни при (15-35)°С, сутки, не менее	180	18 мес		180	180	180	270	360
Электрическая прочность, МВ/м, не менее: а) R; M (15-35 С) 45-75% б) R; M (180±2 С) 20% в) R; 24 ч (40 С) 95±2% M (15-35 С) 45-75 %	70			100 90(155°С) 60	150 100(155°С) 150	100 90(155°С) 60		90 80(155°С) 80
Удельное объемное электрическое сопротивление Ом.м, не менее: а) R; M (15-35 С) 45-75% б) R; M (180±2 С) 20% в) R; 24 ч (40 С) 95±2% M (15-35 С) 45-75 %	5*10 ¹³ 5*10 ¹³	2*10 ¹⁴	8*10 ¹³ 5*10 ¹² (105°С)	1*10 ¹³ 1*10 ¹⁰ (155°С) 1*10 ¹³	8*10 ¹³	1*10 ¹³ 1*10 ¹⁰ (155°С) 1*10 ¹³	2*10 ¹⁴	1*10 ¹⁴ 1*10 ⁸ (155°С) 1*10 ¹⁴
Тангенс угла диэлектрических потерь, не более: а) R; M (15-35 С) 45-75% б) R; M (180±2 С) 20% в) R; M (200±2 С) 20%	0,013 0,02(100°С)	0,008	0,003 0,12(155°С)	0,005 0,07			0,003 0,005 0,005	

Продолжение таблицы 1. Характеристики пропиточных компаундов класса нагревостойкости Н-С зарубежного производства.

Марка материала, предприятие – изготовитель страна-изготовитель	DOBECKAN ALTANA Electrical Insulation Германия							
	FT 2015/60 EK	FT 2015/90E	FT 2015/90EK	FT 2090 LE	MF 8001 NV	MF 8005	MF 8044	PE 820 H 1
Наименование показателя								
Класс нагревостойкости/термогравиметрический индекс, °C	208/222	208/222	208/222		177/201	186/196	188/214	
Вязкость	35-45 с	55-65 с	450-550 МПа.с	1000-1300 МПа.с	6500-8500 МПа.с	850-1150 МПа.с	650-750 МПа.с	1800-2200 МПа.с
Продолжительность желатинизации, мин, не более	63-77 100°C	63-77 100°C	24-34 120°C	3-5 120°C	17-21 120°C	3-7 120°C	3-7 120°C	18-22 120°C
Время жизни при (15-35)°C, сутки, не менее	120	120	360	120	360	360	360	360
Электрическая прочность*, МВ/м, не менее:								
а) R; M (15-35 C) 45-75%	100	100	100			200		175
б) R; M (155±2 C) 20%				93	151	180		
в) R; M (180±2 C) 20%	60	60	60	89		160	181	69
г) R; 24 ч (40 C) 95±2% M (15-35 C) 45-75 %	80	80	80					
Удельное объемное электрическое сопротивление Ом.м, не менее:								
а) R; M (15-35 C) 45-75%	1*10 ¹⁵	1*10 ¹⁵	1*10 ¹⁵	1*10 ¹³	1*10 ¹³	1*10 ¹³	1*10 ¹⁴	1*10 ¹³
б) R; M (155±2 C) 20%	1*10 ⁹	1*10 ⁹	1*10 ⁹	1*10 ⁸				
в) R; M (180±2 C) 20%								
г) R; 24 ч (40 C) 95±2% M (15-35 C) 45-75 %	1*10 ¹³	1*10 ¹³	1*10 ¹³	1*10 ⁹	1*10 ¹¹	1*10 ¹³	1*10 ¹³	1*10 ¹²
Тангенс угла диэлектрических потерь, не более:								
а) R; M (15-35 C) 45-75%								
б) R; M (180±2 C) 20%	0,1(60°C)	0,1(60°C)	0,1(60°C)	0,1(68°C)	0,1(75°C)	0,1(60°C)	0,1(72°C)	0,1(52°C)

* - электрическая прочность определяется на лаковой пленке

Таблица 2. Характеристики пропиточных компаундов класса нагревостойкости Н-С отечественного производства.

Марка материала, технические условия, предприятие - изготовитель	ЭЛПЛАСТ-180 ИД ЗАО «Электроизолит»	ЭЛПЛАСТ-220 ИД ЗАО «Электроизолит»	ЭЛКОМ ПК-21(У) ОАО «ХК ЭЛИНАР»	КП-303 марка В ЗАО «Диэлектрик»	ДИЭЛ-ЭПИК-14 ООО НПФ Диэлектрик	РАНРОЛИВСАН	ЗАО «Дельтапласт»ГУ ОЯШ-504 -145-96КП-200
Наименование показателя							
Класс нагревостойкости/термогравиметрический индекс, °С	180	>180	180	180	≥180	≥180	≥180
Вязкость по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4мм при температуре (20±0,5)°С, с, не более	30-80 при 50°С	60	40 при 40°С	50-100	30	100-3500 сП	20-30 50°С
Продолжительность желатинизации при температуре (150±2)°С, мин, не более	10	10	6-12 160°С, ч	15 160°С	25	30-120 140°С	25 200°С
Время жизни при (15-35)°С, сутки, не менее	180	30(50°С)	180	180	30		180
Электрическая прочность, МВ/м, не менее: а) R; M (15-35 С) 45-75% б) R; M (180±2 С) 20% в) R; M (200±2 С) 20% г) R; 24 ч (40 С) 95±2% M (15-35 С) 45-75 %	25 20	22 15	25 20	25 20	25 23 20	36 32 (275°С)	25 18 18
Удельное объемное электрическое сопротивление Ом.м, не менее: а) R; M (15-35 С) 45-75% б) R; M (180±2 С) 20% в) R; M (200±2 С) 20% г) R; 24 ч (40 С) 95±2% M (15-35 С) 45-75 %	1*10 ¹³ 5*10 ⁸ - 5*10 ¹¹	1*10 ¹² 5*10 ⁸ - 1*10 ¹¹	1*10 ¹³ 1*10 ⁹ - 1*10 ¹³	1*10 ¹³ - 1*10 ¹²	1*10 ¹³ 1*10 ¹² 5*10 ¹¹ 5*10 ¹²	1*10 ¹⁴ 3*10 ¹³	1*10 ¹³ 1*10 ⁹ 1*10 ¹²
Тангенс угла диэлектрических потерь, не более: а) R; M (15-35 С) 45-75% б) R; M (180±2 С) 20% в) R; M (200±2 С) 20%			0,01 0,10		0,006 0,008 0,010		

Таблица 3 Результаты испытаний компаундов

Марка материала, предприятие – изготовитель страна-изготовитель	ОАО «ХК ЭЛИНАР» ЭЛКОМ ПК-21(У)	ЗАО «Электроизолит» ЭЛПЛАСТ-180 ИД	ЗАО «Электроизолит» ЭЛПЛАСТ-220 ИД	ЗАО «Диэлектрик» КП-303 марка В	ООО НПФ Диэлектрик ДИЭЛ-ЭПИК-14	ООО «НПК Пенга»П-541	ИталияALBERSIANO SISADOLPHON PDR 1962	ИталияALBERSIANO SISADOLPHON CC1118/LV
Наименование показателя								
Электрическая прочность, МВ/м: а) R; M (15-35 C) 45-75% б) R; M (180±2 C) 20% в) R; M (200±2 C) 20%			27,4 13,1	30,9 32,3	36,7 35,5 33,4	27,3	31,2	35,3
Удельное объемное электрическое сопротивление Ом.м R; M (15-35 C) 45-75% R; M (155±2 C) 20% R; M (180±2 C) 20% R; M (200±2 C) 20% R; M (220±2 C) 20%	1,3*10 ¹⁴ 5,4*10 ¹¹ 4,1*10 ⁹	6,6*10 ¹³ 2,8*10 ⁸ 2,7*10 ⁷	4,0*10 ¹⁴ 1,8*10 ⁸ 4,4*10 ⁷	9,8*10 ¹³ 4,7*10 ⁸ 2,3*10 ⁸	2,8*10 ¹⁴ 6,8*10 ¹² 1,7*10 ¹² 5,7*10 ¹¹ 1,9*10 ¹¹	3,7*10 ¹⁴ 1,4*10 ⁹ 2,8*10 ⁸ 1,2*10 ⁸	2,1*10 ¹⁴ 1,4*10 ⁷ (120°C)	3,4*10 ¹⁴ 2,2*10 ⁸ 1,2*10 ⁸ 9,2*10 ⁷
Тангенс угла диэлектрических потерь R; M (15-35 C) 45-75% R; M (155±2 C) 20% R; M (180±2 C) 20% R; M (200±2 C) 20% R; M (220±2 C) 20%	0,007 0,039 0,093	0,008 0,73	0,012 0,45 0,97	0,015 0,154 0,510	0,0054 0,0036 0,0041 0,0051 0,0090	0,0092 0,100	0,009 0,95 (120°C)	0,0033 0,0100
Усадка, %	3,1	2,5	2,7	1,2	0,7	3,4	2,9	0,5

Однокомпонентный пропиточный компаунд на эпоксидной основе DOLPHON PDR 1962 производства фирмы ALBESIANO SISA (Италия) по проспектным данным должен соответствовать классу нагревостойкости F-H. Данных при повышенной температуре нет (табл.1). Результаты испытаний - характеристики отвержденного компаунда при комнатной температуре весьма приличные (табл.3, рис.2,3), однако уже при 120°C (класс нагревостойкости E) удельное объемное электрическое сопротивление снижается до седьмой степени (близко к полупроводящим свойствам), тангенс угла диэлектрических потерь приближается к 1. Т.е. говорить о хороших свойствах компаунда при 155°C, тем более при 180°C не приходится.

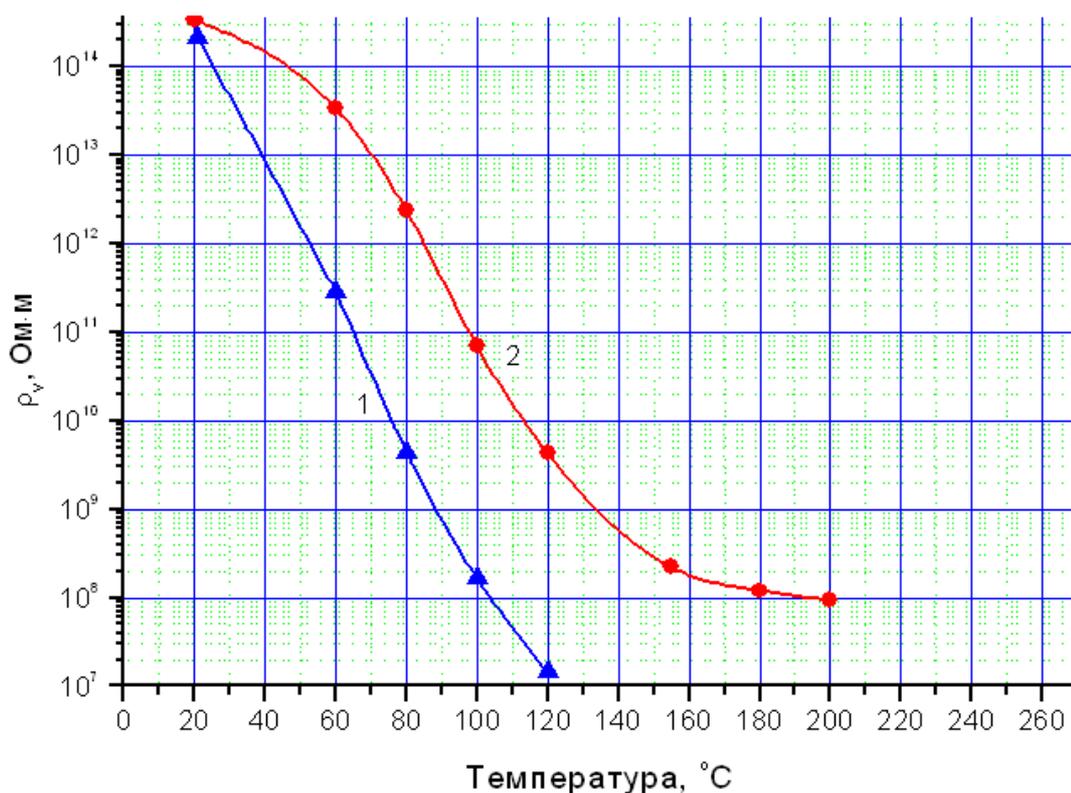


Рис.2. Зависимость удельного объемного электрического сопротивления от температуры для компаундов зарубежного производства.
1 - Dolphon PDR-1962, 2 - Dolphon CC-1118-LV

Пропиточный компаунд, специально предназначенный для вакуум-нагнетательной пропитки DOLPHON CC-1118-LV производства фирмы ALBESIANO SISA (Италия) также на эпоксидной основе рассчитан на класс нагревостойкости H. Характеристики при

повышенных температурах по проспектным данным ограничиваются 155°C (табл.1). По результатам испытаний при 180°C удельное объемное электрическое сопротивление

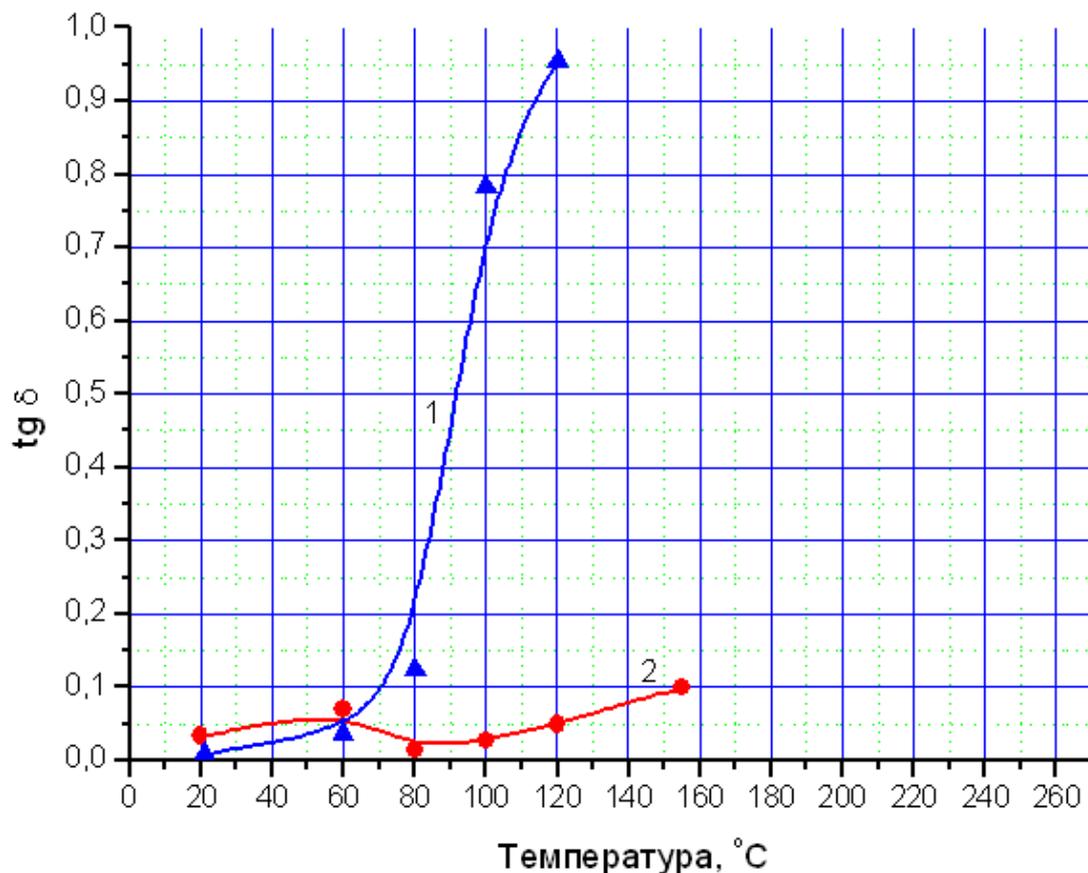


Рис.3. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для компаундов зарубежного производства.
1 - Dolphon PDR-1962, 2 - Dolphon CC-1118-LV

снижается до $1 \cdot 10^8$ Ом.м, а тангенс угла диэлектрических потерь также как и у предыдущего образца приближается к 1.

Далее рассмотрим компаунды марок Элпласт-180ИД [8] и Элпласт-220ИД [9] производства ЗАО Электроизолит (г.Хотьково). Компаунды рассчитаны на рабочие температуры 180°C и 200°C. Удельное объемное электрическое сопротивление для обоих компаундов приведено при 180°C (табл.2), а тангенс угла диэлектрических потерь не указан ни при комнатной, ни при повышенной температуре. Результаты испытаний (табл.3, рис 4,5) показывают, что удельное объемное электрическое сопротивление снижается при 180°C до $3-4 \cdot 10^7$ Ом.м, не дотягивая до заявленных в проспектах значений $5 \cdot 10^8$

Ом.м, тангенс угла диэлектрических потерь для Элпласт-180ИД невозможно измерить, а для Элпласт-220ИД составляет 0,97, т.е. близок к 1. Следует также отметить, что при получении дисков для испытаний на стадии отверждения наблюдалась потеря массы образцов от 12%

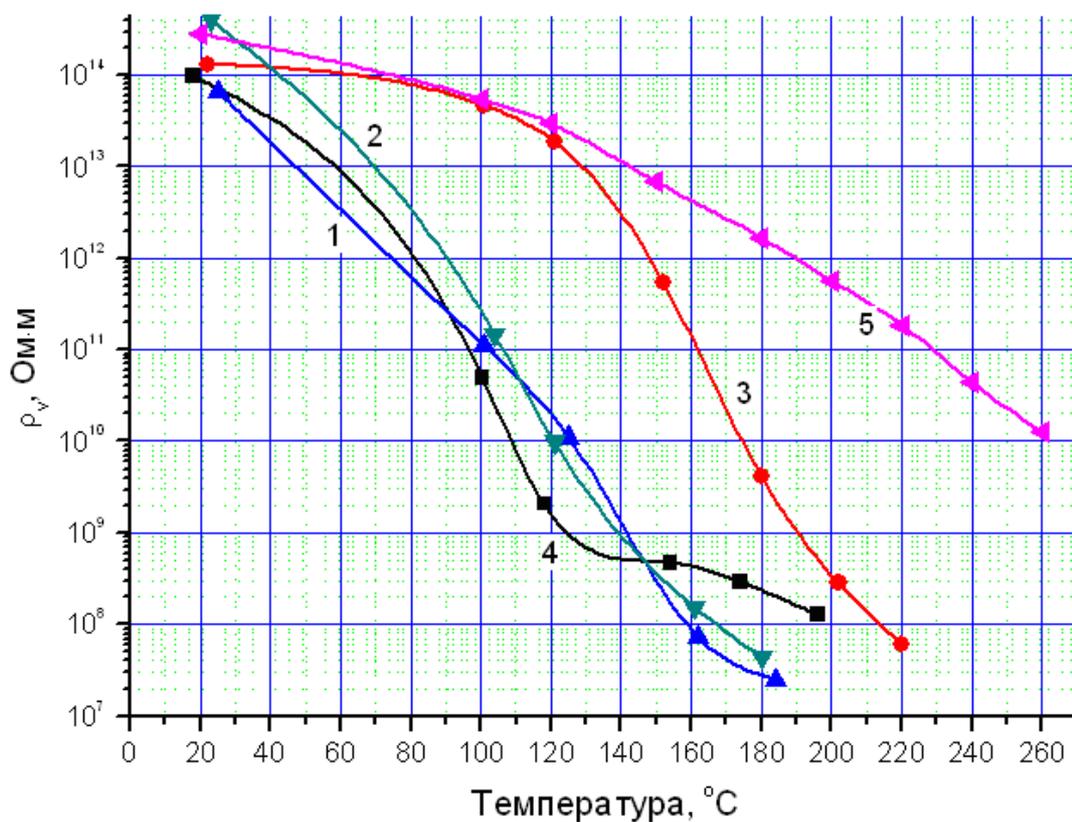


Рис.4. Зависимость удельного объемного электрического сопротивления от температуры для композитов отечественного производства.
1 - Элпласт-180ИД, 2 - Элпласт-220ИД, 3 - Элком ПК-11, 4- КП-303,
5 - ДИЭЛ-ЭПИК-14

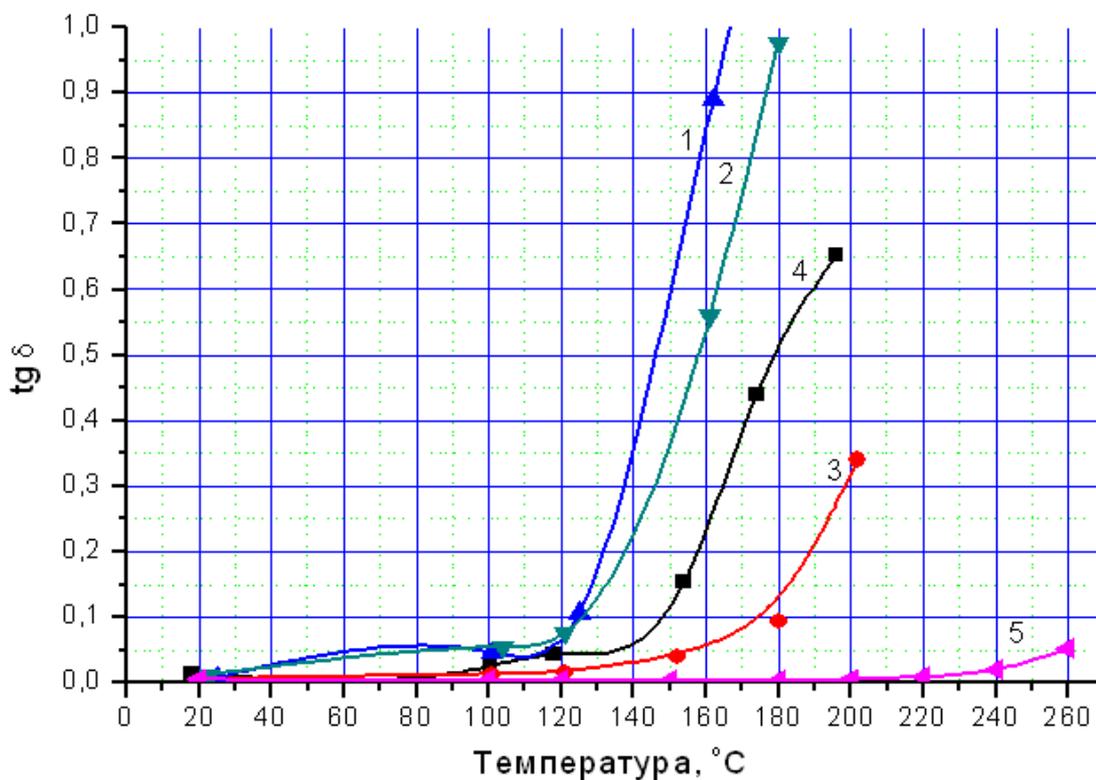


Рис.5. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от температуры для компаундов отечественного производства.

2 - Элпласт-180ИД, 2 - Элпласт-220ИД, 3 - Элком ПК-11, 4- КП-303,
5 - ДИЭЛ-ЭПИК-14

до 17%, хотя компаунд подразумевает отсутствие растворителей и летучих, особенно в таких количествах.

Пропиточный компаунд ЭЛКОМ ПК-21(у) [11] производства ОАО «ХК Элинар» по данным технических условий имеет весьма приличные характеристики при 180°C - удельное объемное электрическое сопротивление $1 \cdot 10^9$ Ом.м и тангенс угла диэлектрических потерь 0,1 (табл.2). Проведенные испытания полностью подтвердили заявленные значения (табл.3, рис.4,5). К недостаткам следует отнести очень длительное время желирования – 6-12 часов при 160°C и необходимость кондиционирования образцов перед испытаниями при 180°C в течение 16-18 часов. Также как и компаундов марки Элпласт при отверждении образцов наблюдаются повышенные потери массы, достигающие 11%.

Компаунд КП-303 [10] производства ЗАО «Диэлектрик» предназначен для систем изоляции класса нагревостойкости Н. В технической документации электрические харак-

характеристики при повышенных температурах не приведены (табл.2). Испытания показали, что при 180°C удельное объемное электрическое сопротивление опускается до $2 \cdot 10^8$ Ом.м, тангенс угла диэлектрических потерь достигает 0,5 (табл.3, рис.4,5). Т.е. компаунд по этим характеристикам занимает промежуточное положение между Элпласт-220ИД и Элком ПК-21(у). Потери массы при отверждении незначительные – порядка 1,5%. Это является следствием быстрого желирования компаунда, однако по этой же причине на дисках наблюдается мелкая сыпь. Скорее всего это микрогели, которые являются результатом неравномерного отверждения.

Наиболее подробная информация о свойствах при комнатной и повышенных температурах имеется по компаунду ДИЭЛ-ЭПИК-14 [12] производства ООО НПФ Диэлектрик. Компаунд сохраняет на очень высоком уровне удельное объемное электрическое сопротивление – $1,9 \cdot 10^{11}$ Ом.м при 220°C и тангенс угла диэлектрических потерь – 0,009 при той же температуре (табл.3, рис.4,5). Электрическая прочность составляет около 37 кВ/мм при комнатной температуре и около 35 кВ/мм при 180°C. К недостаткам компаунда можно отнести отсутствие широкого опробования в промышленных условиях.

Многие производители оценивают быстрое желирование компаунда как большое технологическое преимущество, позволяющее существенно сократить процесс запечки изоляции. Однако это имеет и вторую сторону. Быстрое отверждение компаунда, как правило, проходит неравномерно по объему, возможно множественное образование дефектных мест. Подтверждением этому является большой разброс значений по электрической прочности быстро отверждающихся компаундов DOLPHON PDR 1962, КП-303 и П-541. На дисках, отлитых из этих компаундов для электрических испытаний и отвержденных по быстрому рекомендованному режиму наблюдались многочисленные вкрапления микрогелей по которым возможен преждевременный электрический пробой. То же, очевидно, наблюдается и в реальной системе изоляции.

Конечно, длительное желирование, которое мы наблюдаем у компаунда ЭЛКОМ ПК-21(у) является крайним случаем, поэтому при подборе рецептуры и режимов отверждения необходимо находить «золотую середину».

В конечном итоге при выборе пропиточного компаунда для определенной системы изоляции необходимо проведение макетных и ресурсных испытаний, так как из приведенных выше данных не всегда ясно на каком основании тот или иной компаунд относят к классам нагревостойкости Н-С.

Литература

1. Справочник по электротехническим материалам. Т.1, М., «Энергия», 1974
2. Электротехнический справочник, т.1, М., изд. МЭИ, 2003
3. Алиев И.И., Калганова С.Г.. Электротехнические материалы и изделия. Справочник. М., ИП РадиоСофт, 2005
4. <http://www.penta-91.ru/>
5. <http://www.elantas.com/>
6. <http://www.albesiano.com/>
7. <http://www.vonroll.com/>
8. ТУ 2257-068-05758799-2002, Элпласт-180ИД
9. ТУ 2257-082-05758799-2002, Элпласт-220ИД
10. ТУ 2257-019-31885305-2003, КП-303
11. ТУ 2257-065-50157126-2006, ЭЛКОМ ПК-21(у)
12. ТУ 2388-014-43286062-2007, ДИЭЛ-ЭПИК-14