

**Критерии, определяющие выбор ЭИМ  
и технологий создания  
систем изоляции электрических машин  
постоянного и переменного тока.**

**Генеральный директор ЗАО «Диэлектрик»  
Прохоров В.В.**

**2014г.**

Оценка качественных характеристик систем изоляции электрических машин должна производиться путём замера конкретных показателей в условиях реально работающей под максимальной нагрузкой электрической машины, т. е. при наличии температур возможного перегрева узлов машины (катушек магнитной системы, секций якоря и т. п.) до 200<sup>0</sup>С и возможных скачков напряжения в сети. Подход должен быть с точки зрения теории химии и физики диэлектриков. (Материалы кафедры физики и технологии электротехнических материалов и компонентов (ФТЭМК), Московский Энергетический Институт)[1].

Учитывая, что система изоляции, например для тяговых электродвигателей (ТЭД), представляет собой запеченную в монолит композицию из нескольких различных электроизоляционных материалов, оценку ожидаемых конечных результатов можно делать с определенным приближением через оценку свойств конкретных электроизоляционных материалов (ЭИМ).

Тепловой баланс электрической машины должен обеспечивать условие, когда образующая за счет потерь тепловая мощность должна быть меньше отводимой, т.е

$$P_{\text{обр.}} < P_{\text{отв.}}$$

При этом разогрев работающей электрической машины происходит :

1) за счет потерь в проводнике, из-за наличия определенного омического сопротивления проводника и

2) за счет потерь в изоляции, из-за наличия тока утечки ( $J_{\text{ут}}$ ) т. е.

$$P_{\text{обр.}} = P_{\text{пр.}} + P_{\text{из}}$$

При расчетах конструкции электрических машин мощность потерь в проводнике учитывается , а потери в изоляции не учитываются .

Это категорически недопустимо, т.к. потери в изоляции, работающей электрической машины и разогретой до температуры порядка 200<sup>0</sup>С, могут превысить критический уровень, что может привести к тепловому пробую и создает условия для самовоспламенения.

$$P_{\text{изол}} = U^2 \cdot \text{tg}\delta \cdot C_x \cdot 2 \pi f$$

Рассмотрим физический смысл определений:

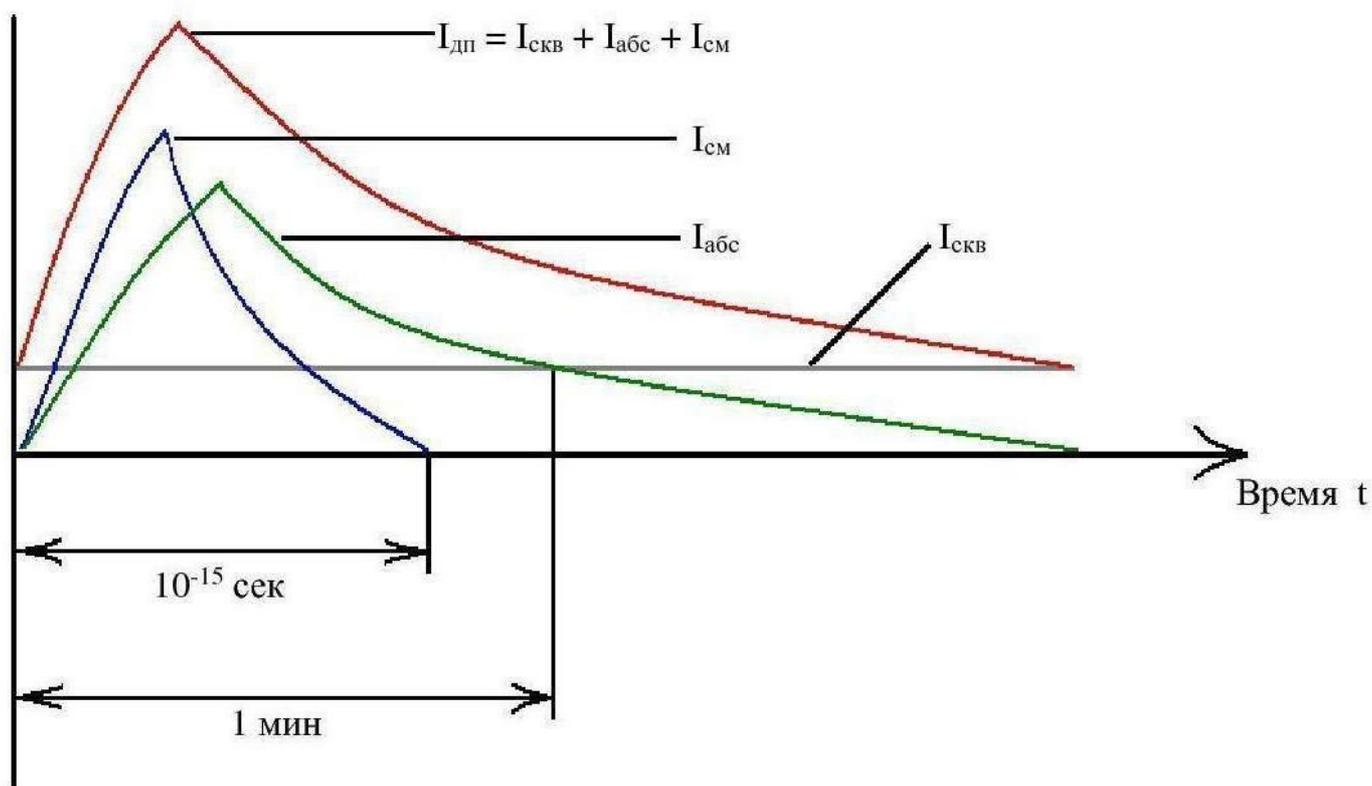
### 1. Токов утечки

$$J_{\text{ут.}} = J_{\text{см.}} + J_{\text{абс.}} + J_{\text{скв.}}$$

### 2. Тангенса угла диэлектрических потерь

$$\text{tg}\delta = J_a / J_p$$

## Поведение тока диэлектрических потерь ( $J_{дп}$ ) в зависимости от времени приложения постоянного напряжения к диэлектрику



$J_{скв}$  — ток сквозной проводимости - **основная причина тепловых потерь** и обусловлен наличием в диэлектрике свободных носителей зарядов.

$J_{см}$  — ток смещения - вызван процессами быстрой поляризации за счет смещения электронов на орбите по направлению внешнего поля. Это чисто емкостной ток, **не вызывающий тепловых потерь**.

$J_{абс}$  — ток абсорбции - вызван процессами поляризации из-за ориентации векторного поля молекулы по направлению внешнего поля.

В электромагнитном поле постоянного тока влияние  $J_{абс}$  на тепловые **потери** оказывает только в момент **включения и выключения**, в электромагнитном поле переменного тока - **это основная причина тепловых потерь (наряду с  $J_{скв}$ )**, а также **причина старения, разрушения изоляции и возникновения частичных разрядов**.

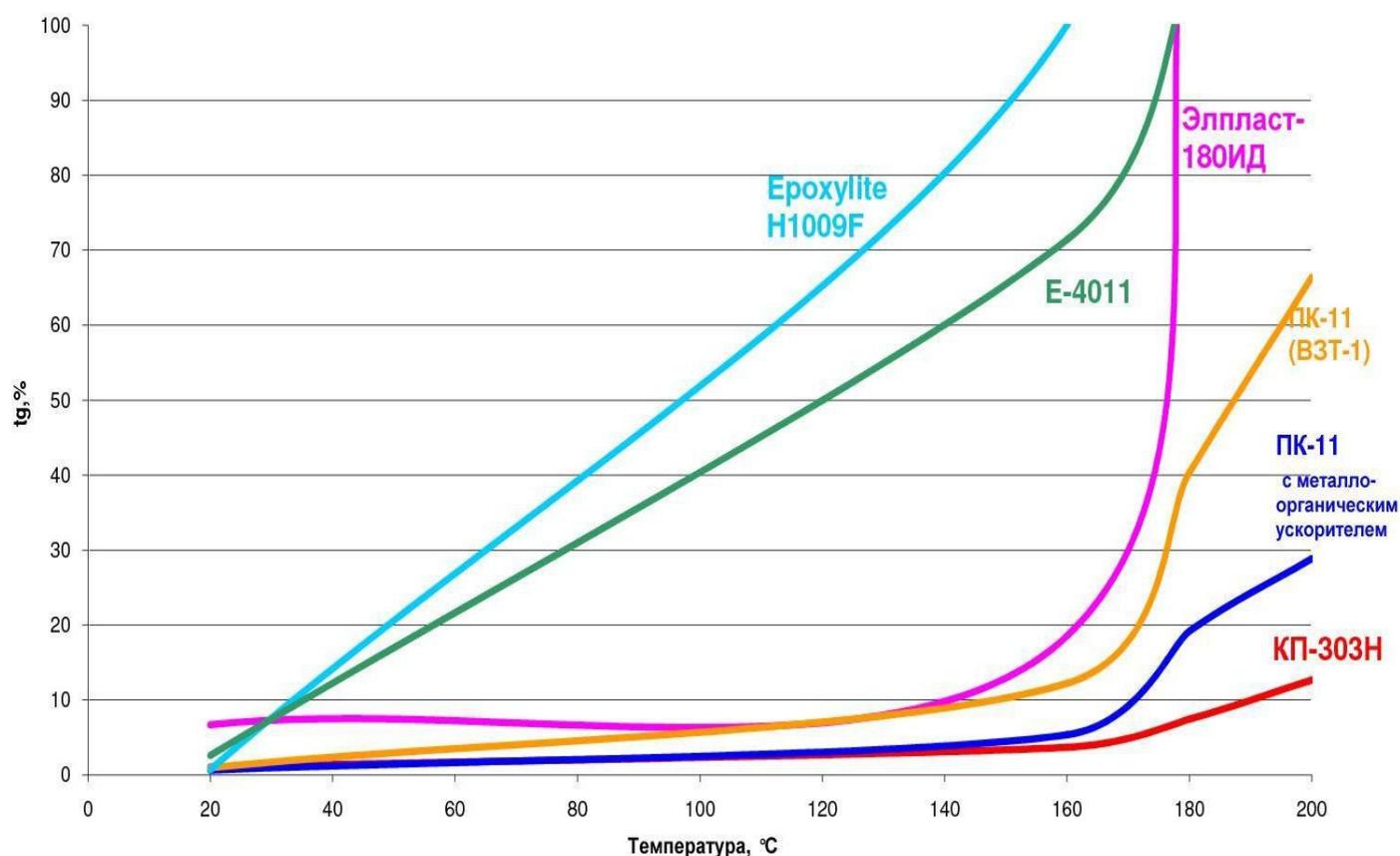
ЭИМ для систем изоляции электрических машин переменного тока следует оценивать дополнительно по такому показателю, как **стойкость к воздействию частичных разрядов (ЧР)**.

**Физическая сущность** этого показателя заключается в том, что в диэлектрике под воздействием внешнего знакопеременного электрического поля **идет знакопеременная**

**поляризация молекул**, в отличие от поляризации постоянного электрического поля, где влияние процесса поляризации сказывается только в моменты включения и выключения электрической машины. При этом диэлектрик состоит из множества молекул, которые образуют сегменты. Поведение молекул и сегментов в электрическом поле определяется величиной их электрического момента. **Из-за неоднородности** молекулярной массы сегментов появляются точки, имеющие различные электрические потенциалы и при этом находящиеся в непосредственной близости. Расстояние между ними определяется молекулярными величинами — ангстремами. При достижении определенных величин потенциалов, происходит **разряд**, который мы называем **частичным разрядом**. Воздействие на молекулу знакопеременных электромагнитных волн раскачивает молекулу с частотой напряжения электрического поля и приводит к **разрушению полимера**. Появляются условия для образования **лавинных частичных разрядов**, а это приводит к местным **прогарам** изоляции и **электрическому пробую**.

График зависимости **тангенса угла диэлектрических потерь от температуры** для различных пропитывающих составов (испытания проводились на дисках толщиной 1 мм, все диски запекались при температуре 160 °С в течение 16 часов).

Резкое нарастание значения  $\text{tg}\delta$  (в 3-4 раза) определяет, что в такой же степени увеличивается активная составляющая тока утечки ( $I_a$ ), Это вызвано тем, что под влиянием температуры идет ослабление межмолекулярных связей и происходит срыв электронов с их орбиты. Появляются дополнительные свободные носители заряда, т. е. появляется электронно(ионно) — дырочная проводимость и **диэлектрик переходит в разряд полупроводников или даже проводников**.



Образующееся тепло в электрической машине необходимо удалить и это определяет **условия и требования к конструкции электрической машины и применяемым материалам.**

$$P_{\text{отв}} = \lambda \cdot S/h \cdot (T_2 - T_1), \text{ где}$$

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности изоляционного слоя, состоящего из комплекса материалов (стеклоткань+слюдяная бумага+ пленки+связующее),

$S$  – площадь поверхности, с которой необходимо обеспечить отвод тепла,

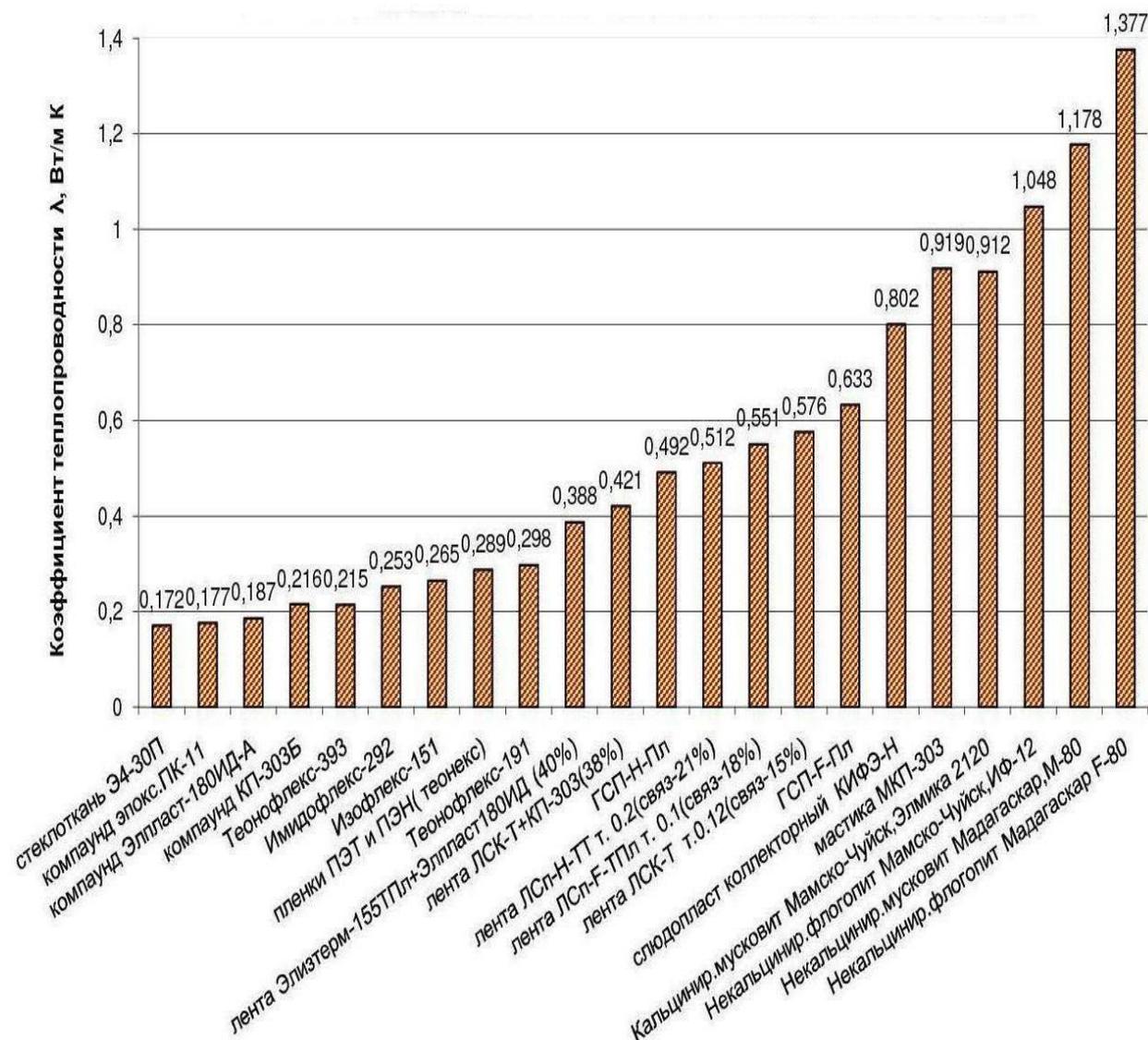
$h$  - толщина изоляционного слоя,

$T_2$  -температура разогрева в изоляционном слое ,

$T_1$ - температура окруж. среды.

## Теплопроводность электроизоляционных материалов (оценочно)

(Зондовый метод по ГОСТ 30256-94 с помощью измерителя теплопроводности «МИТ-1» ТУ 4211-001-302531012-02; св. о проверке №8246 от 02.02.09 ФГУ ЧЦСМ; основная отн. погрешность измерения  $\pm 7\%$ )



## Проблема электродвигателей с частотно-регулируемым приводом (ЧРП)

**ЧРП — это значит наличие метода широтно — импульсной модуляции (ШИМ).** Это значит быстрое изменение напряжения, которое приводит к появлению высоковольтных градиентов напряжения в проводнике, которые воздействуют на изоляцию проводников и обмоток двигателя. **Эти импульсные перенапряжения могут быть в 2-3 раза выше номинального, что приводит к возникновению частичных разрядов (ЧР) и пробую изоляции.**

Появление двигателей с ЧРП привело к **проблеме**, которая до настоящего времени, в нашей промышленности вызывает непонимание и **недооценена**.

Увеличение стресса на изоляцию из-за импульсных напряжений приводит к выходу из строя двигателей. **Стрессы возникают из-за взаимодействия быстрорастущих импульсов напряжения в приводе и эффектов наложения этих импульсов в кабеле.** Они зависят от частоты импульса и времени роста напряжения в инверторе, длины кабеля и конструкции статорных обмоток. Время нарастания импульсов очень мало. Это всего лишь **0,25 — 1 МКС.** Пока импульс идет по кабелю к двигателю происходит изменение формы импульса от наложения догоняющих импульсов и это приводит к возникновению градиента напряжения.

**Из-за этого эффекта на зажимах двигателя возникает увеличение напряжения до 2-х раз выше, чем на выходе с инвертора.** Ко всему прочему, распространение напряжения в обмотках двигателя зависит от параметров двигателя и обмоток.

На **межфазную** систему изоляции и **между фазой и землей** это явление имеет слабое воздействие, так как там присутствует изоляция с большим запасом электрической прочности, а вот на **межвитковую изоляцию оказывает сильнейшее воздействие**, т.к. потенциал **напряжения между витками**, особенно между всыпными проводниками, может **достигать значений напряжения равного рабочему напряжению двигателя**, что соответствует величинам напряжения вызывающим частичные разряды (см. таблицу 1), а изоляция **витковая рассчитана по принципу электрических машин постоянного тока, т. е. из расчета, что напряжение между витками меньше рабочего в разы, определяющиеся количеством витков.**

В таблице 1 собраны данные Von Roll Izola об импульсных напряжениях возникающих в двигателях, работающих с ЧРП.

Таблица 1.

	Фактор импульсного перенапряжения	Импульсное напряжение		
		$U_N = 400 \text{ В}$	$U_N = 575 \text{ В}$	$U_N = 690 \text{ В}$
		$U_d = 565 \text{ В}$	$U_d = 815 \text{ В}$	$U_d = 975 \text{ В}$
Фаза - Земля	$2.0 * U_d$	1130 В	1630 В	1950 В
Фаза - Фаза	$2.3 * U_d$	1300 В	1870 В	2240 В
Проводник - Проводник	$(0.4...0.7) * 2.0 U_d$	450...790 В	650...1140 В	780...1365 В

$U_N =$  Номинальное Напряжение,  $U_d = \sqrt{2} * U_N$

При этом напряжение возникновения частичных разрядов (PDIV) на различных проводниках по данным Von Roll Izola выглядит следующим образом:

Провод	(PDIV)
Эмалированный провод grade 2(ПЭТ2)	830 В
Всыпной эмалированный провод	790...940 В
SamicaShield®провод	1270 В
SamicaShield®провод пропитанный (3340)	1890 В

Это определяет необходимость выбора изоляции обмоточных проводов, обеспечивающей:

**1. Уровень начала возникновения частичных разрядов (PDIV) более высокий, чем уровень напряжения электрического поля действующего на изоляцию при рабочем напряжении на зажимах двигателя с учетом возникающих импульсных перенапряжений.**

**2. Стойкость изоляции к воздействию частичных разрядов .**

Специалисты ЗАО «Диэлектрик» провели ряд испытаний имеющихся отечественных обмоточных проводов в своем испытательном центре ОАО «НИИЦЭИМ». Для испытаний определили три группы обмоточных проводов:

**1 группа** — провода с эмалевой изоляцией :

1) стандартные: - ПЭТВ СД

- ПЭТ2 — 200

2) новая разработка — с покрытием полиимидной эмалью

**2 группа** - ПШИПК -Т, изолированные полиимидофторопластовой пленкой

- ПШИПК-2, изолированные короностойкой

полиимидофторопластовой пленкой фирмы Дюпон.

**3 группа** — провода со слюдосодержащей изоляцией:

1) стандартная - ППЛС т.0,47 мм ( изоляцией Каластик)

2) новые разработки : - ППФК т. 0,36 мм с изоляцией, наложенной на проводник, 1 слой в ½ нахлеста из ЭИМ:

- ЛЭФ — ПЭТ

- ЛСК — Т

- ЛСК — Т — ПЭТ

- ЛСК — Т — ПМ

- Микасил 0,08

- ППФК т. 0,65 мм с изоляцией, наложенной на проводник 2 слоя в ½ нахлеста из ЭИМ:

- Микасил 0,08

- ППФК т. 0,64 (с изоляцией, наложенной на проводник, 2 слоя в ½ нахлеста из ЭИМ):  
 - ЛСП-Н-ТПл 0,08

Испытательное напряжение было задано частотой 50 Гц в номинальных значениях:  
 1680 В — 3000В - 4500 В - 10 000 В.

Температурный режим — температура окружающей среды (20°С — 30°С)

Результаты текущих испытаний сведены в нижеприведенную таблицу.

Наименование, обмоточные провода	Толщина изоляции х 2(мм)	U <sub>пр</sub> между 2-я проводами (кВ)	Выход из строя, % / час			
			1680 В	3000 В	4500 В	10 000 В
<b>1 группа</b>						
- ПЭТВ СД	0,24	11	100/48	-	-	-
- ПЭТ2 — 200	0,07	9,2	100/177	100/75	-	-
- с покрытием полиимидной эмалью	0,24	12	100/2	-	-	-
<b>2 группа</b>						
- ППИПК — Т (полиимидофторопластовая изоляция)	0,36	27	100/134	100/100	-	-
- ППИПК — 2 (короностойкая полиимидофторопластовая изоляция)	0,68	35	0/1989	0/2300	-	-
<b>3 группа</b>						
<b>1) ППЛС:</b>						
- Kalastik 0,09мм+ПЭТ 0,02 мм	0,47	19	-	-	100/47,5	100/6,5
- ЛЭФ — ПЭТ	0,36	7,8	100/149	-	-	-
- ЛСК -Т	0,36	3,8	77/2751	-	-	-
- ЛСК-Т-ПЭТ	0,38	6,0	0/1481	100/162	-	-
- ЛСК -Т- ПМ	0,36	17	-	100/83	-	-
<b>2) ППФК:</b>						
- Микасил 1 слой х ½ нахлеста	0,32	15	-	0/338	0/474	-

- Микасил 2 слоя x ½ нахлеста	0,65	38	-	-	-	0/355
<b>З)ППФК :</b> - Микасил-ТПл(п) (пропитанный) 2 слоя x ½ нахлеста	0,64	30	-	-	-	0/100
- Микасил-ТПл(п) (пропитанный) 1 слой x ½ нахлеста	0,3	11	-	0/20	-	-
- Микасил-ТПл (не пропитанный) 1 слой x ½ нахлеста	0,3	8	-	100/12,5	-	-

Испытания продолжаются.