

# ТЕПЛОПРОВОДНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ И ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А.И. Ермилова, И.Н. Мамонов, Е.В. Калугина, А.Н. Крючков

Полимерные материалы являются типичными теплоизоляторами – теплопроводность стандартных пластмасс лежит в диапазоне 0,1–0,35 Вт/м·К. Вопросы охлаждения и отвода излишнего тепла актуальны для обеспечения оптимальных условий работы элементов техники, таких как широко используемые в быту электрические приборы, включая светодиодную аппаратуру, компьютеры, изоляцию кабелей и др.

В обзоре [1] рассмотрены промышленные разработки теплорассеивающих полимерных композиционных материалов применительно к изделиям разных областей техники, а также, на наш взгляд, достаточно лаконично и доступно неспециалисту описаны физические явления, касающиеся теплопередачи.

Способность твердых тел проводить тепло связана с их структурой, составом и характеризуется коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  (Вт/м·К). Рассеивание тепла происходит на границе раздела фаз воздух – твердое тело. Законы теплопередачи в режиме так называемой естественной конвекции таковы, что имеется неко-

торый конкретный предел количества тепла, которое может быть поглощено с единицы теплоотдающей поверхности окружающим воздухом. Это количество тепла не зависит от теплопроводности отдающего тепло материала (будь то дерево, металл, пластмасса или бумага). Для охлаждения в целом это означает, что повышение коэффициента теплопроводности имеет смысл лишь до того момента, пока количество транспортируемого через тело тепла не достигнет значения, которое может быть максимально принято (рассеяно) воздухом на последнем, лимитирующем этапе. Согласно расчетам, «эффективно» работающая величина коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$  колеблется в районе 5–10 Вт/м·К. Дальнейшее увеличение уже избыточно и не приведет к увеличению теплосъема в целом. Этот вывод подтверждается серией экспериментов, проведенных американской компанией CoolPolymers, в которых тепловой источник постоянной мощности (5 Вт) закреплялся на пластинах одинакового размера, изготовленных из материалов с разной теплопроводностью (рис. 1).

## ПЕРЕПАД ТЕМПЕРАТУР

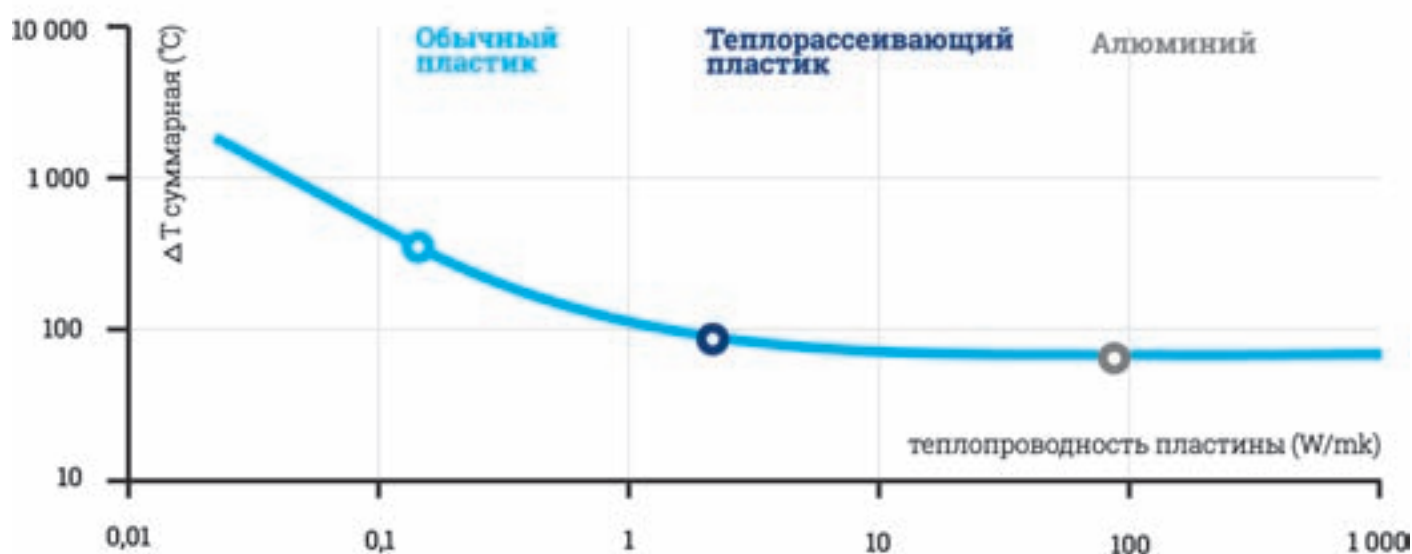


Рис. 1 Влияние теплопроводности материала пластины на неравномерность ее температурного поля при точечном нагреве [1]

## Коэффициент теплопроводности различных типов наполнителей Вт/м·К

Стекловолокно

0,036

Тальк

0,02

Карбонат кальция

0,93

Нитрид бора

180

Графит

280–520

Нитрид алюминия

285

Карбид бора

20

Оксид цинка

54

Углеродные нанотрубки

500–5500

**Таблица 1** Теплопроводность наполнителей

За точку отсчета брали пластину из базовых полимеров (теплопроводность 0,15 Вт/м·К). Измеряли максимальный перепад температур, возникающий на пластине за счет выделяемого источником тепла. При более чем десятикратном увеличении теплопроводности от 0,2 до 2,0 Вт/м·К перепад температур по пластине снизился в 20 раз, т. е. наблюдалось очень эффективное выравнивание температурного поля. Однако уже следующее (стократное) увеличение теплопроводности с 2,0 до 200 Вт/м·К (чистый алюминий) привело лишь к незначительному уменьшению перепада по поверхности пластины на 2–4 °С. Тем самым было подтверждено, что теплопроводящий потенциал алюминия используется в режиме естественного охлаждения в лучшем случае лишь на одну десятую своих возможностей, а его применение технически избыточно.

До некоторого времени почти стократный разрыв между реальной и требуемой для изготовления охлаждающих устройств теплопроводностью  $\lambda_{\text{эф}}$  не позволял разработчикам использовать общепризнанный экономический потенциал применения пластмасс в массовых технологиях. Это особенно актуально для тиражируемых в миллионных количествах современных телефонов, компьютеров, светильников и других потребительских приборов и микросистемных устройств (МЭУ). Именно пластмассовые корпуса, монтажные платы и другие многочисленные детали из пластмасс являются в них по существу объединяющей, интегрирующей средой для взаимодействия

радиоэлектронных и других функциональных элементов и потребителя. Массовая доля содержания пластмасс в этих изделиях неуклонно повышается и достигает в некоторых случаях 90–95%. Поэтому понятно было стремление разработчиков попытаться использовать пластмассы и для охлаждения МЭУ.

Вполне логичным является решение задачи повышения теплопроводности пластмасс путем наполнения. В табл. 1 представлены коэффициенты теплопроводности некоторых наполнителей, традиционно используемых в рецептурах полимерных композиционных материалов (ПКМ).

В работах [2, 3] рассмотрены теоретические основы создания полимерных композиционных материалов с заданной теплопроводностью, а также обсуждены вопросы компьютерного моделирования. Обычно структура ПКМ и его свойства изучаются на двух типах моделей: с неконтактирующими частицами наполнителя и на модели зернистой системы, где частицы наполнителя контактируют друг с другом (цепочечная модель). Эти модели напрямую связаны с концентрацией наполнителя в ПКМ. Возможна и смешанная модель с ограниченно хаотичным расположением компонентов, когда в структуре перемешаны непрерывные цепочки наполнителя и неконтактирующие частицы. Для расчета эффективного коэффициента теплопроводности ПКМ необходимо знать теплопроводность полимера и наполнителя и концентрацию наполнителя. Обычно для расчета  $\lambda_{\text{эф}}$  пользуются следующими формулами:

Формула Максвелла:

$$\lambda_{эф} = \lambda_{среды} \frac{\lambda_{частиц} + 2 \lambda_{среды} - 2 v_{частиц} (\lambda_{среды} - \lambda_{частиц})}{\lambda_{частиц} + 2 \lambda_{среды} + v_{частиц} (\lambda_{среды} - \lambda_{частиц})}$$

Формула Дульнева (адиабатические границы ячейки):

$$\lambda_{эф} = \lambda_{среды} \frac{1 - \left(1 - \frac{\lambda_{среды}}{\lambda_{частиц}}\right) v_{частиц}^{\frac{1}{3}} (1 - v_{частиц}^{\frac{2}{3}})}{1 - v_{частиц}^{\frac{1}{3}} \left(1 - \frac{\lambda_{среды}}{\lambda_{частиц}}\right)}$$

Формула Дульнева (изотермические границы ячейки)

$$\lambda_{эф} = \lambda_{среды} \frac{1 + \left(\frac{\lambda_{частиц}}{\lambda_{среды}} - 1\right) v_{частиц}^{\frac{2}{3}}}{1 + \left(\frac{\lambda_{частиц}}{\lambda_{среды}} - 1\right) v_{частиц}^{\frac{2}{3}} (1 - v_{частиц}^{\frac{1}{3}})}$$

Формула Оделевского (для кубических включений):

$$\lambda_{эф} = \lambda_{среды} \left(1 - \frac{v_{частиц}}{1 - \frac{\lambda_{частиц}}{\lambda_{среды}} - \frac{1 - v_{частиц}}{3}}\right)$$

Наблюдается хорошая корреляция расчетного и экспериментального значений. Например, коэффициент теплопроводности  $\lambda_{эф}$  (при  $T = 50^\circ\text{C}$ ) полиуретана, наполненного стеклошариками диаметром  $D \leq 100$  мкм, изменяется от 0,146 Вт/м·К при концентрации 5 мас. % наполнителя до 0,310 Вт/м·К при 60 мас.% стеклошариков. В работе [4] показано, что  $\lambda_{эф}$  композиции полисульфона (ПСФ) + 20%  $V_4C$  равен 1,12 Вт/м·К, а сверхмолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) + 20%  $V_4C$  – 1,45 Вт/м·К. Авторами [5] показано, что при 75% объемном содержании наполнителя AlN коэффициент теплопроводности  $\lambda_{эф}$  композиции на основе силиконового каучука СКТН увеличивается десятикратно от 0,35 до 3,60 Вт/м·К, соответственно, при  $T = 20^\circ\text{C}$ . Однако при этом снижаются функциональные характеристики ПКМ – технологичность, деформационно-прочностные свойства и др. При комнатной температуре в полимерном композиционном материале СКТН + 30 об. % AlN значение  $\lambda_{эф}$  равно 1,2 Вт/м·К.

Актуальной проблемой при выборе полимерного материала для кабельных каналов, особенно для кабелей под напряжени-

ем 110–500 кВ, является теплостойкость и теплопроводность полимерного материала. Обычно для прокладки кабелей используют трубы из ПЭВП по ГОСТ 18599-2001. В серии статей [6–8] подробно проанализирован ассортимент труб для прокладки кабелей и нормативная документация, в статьях [9, 10] приводятся тепловые расчеты. На основании расчетов автор статей дает свои рекомендации по полимерным материалам для труб кабельных каналов, основываясь на рекомендованных в нормативной документации температурных режимах эксплуатации напорных труб под действием внутреннего давления. Такой подход кажется нам неверным, поскольку режимы эксплуатации напорных трубопроводов (воздействие внутреннего давления в течение длительного гарантированного времени эксплуатации) принципиально отличаются от эксплуатации кабельных каналов (воздействие внешнего сжимающего усилия и термического воздействия из-за тепловых потоков кабеля).

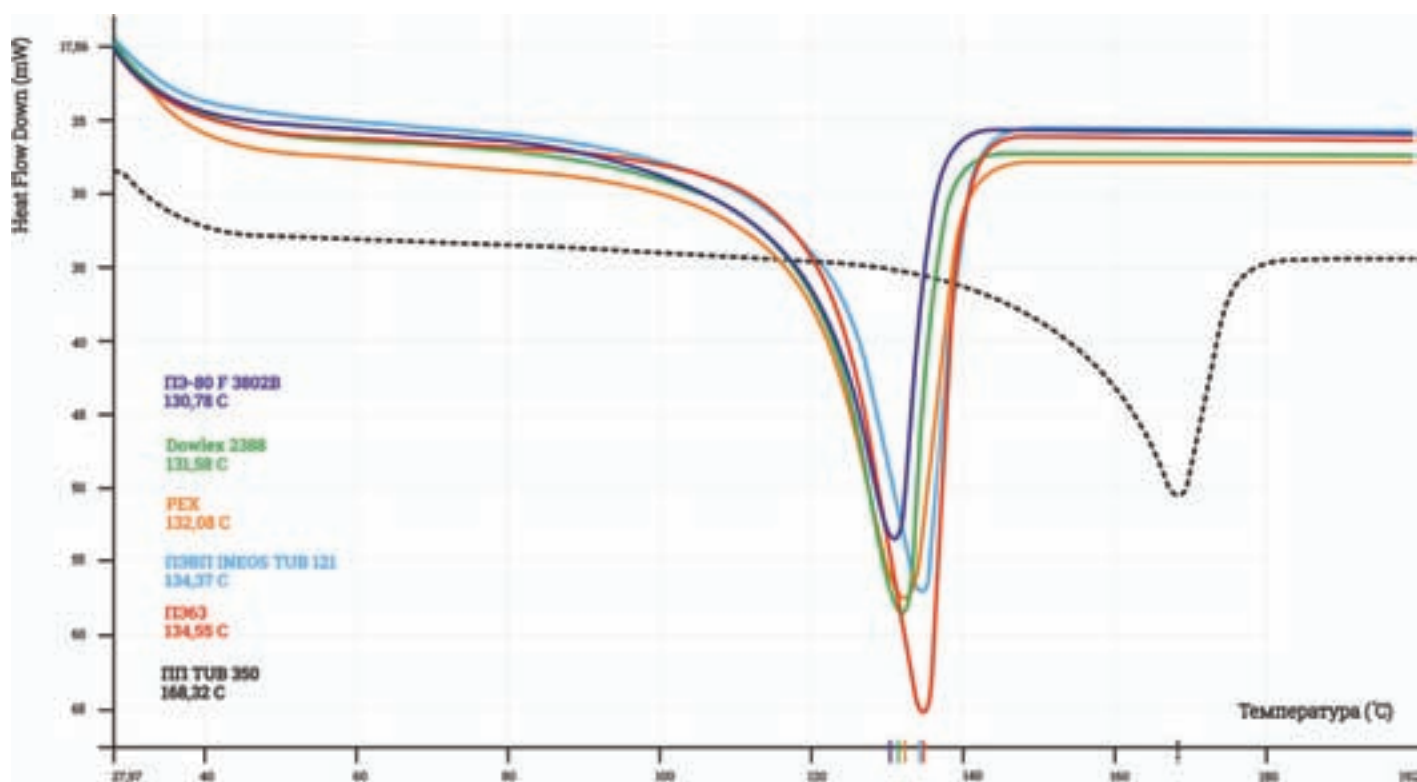
Основные требования к полимерным каналам для прокладки кабельных линий не вызывают сомнения и вполне традиционны с учетом требований к эксплуатации кабелей: кабельные каналы (в виде трубы или другой формы) должны быть способными выдержать длительное воздействие повышенной температуры и воздействия грунта не только в течение срока службы кабеля, но даже за его пределами, т.к. кабель при необходимости может заменяться на новый.

Анализ отечественного рынка труб для кабельных каналов демонстрирует как гладкие трубы, традиционно изготавливаемые из ПЭВП ПЭ 63, ПЭ 80, ПЭ 100, или PE-RT с повышенной термостойкостью, так и двустенные гофрированные трубы, а также рекламируемые автором трубы из специальной композиции, выпускаемые под маркой ProtectorFlex [6].

Вполне логичным представляется применение для кабельного канала высоковольтных кабелей, оболочка которых обычно изготавливается из сшитого полиэтилена PEХ, ПКМ с повышенной теплостойкостью и теплопроводностью, для максимального отвода тепла в почву, что и реализовано, судя по информации, в трубах Electrical Conduit компании Eagle (США) или в трубах из хлорированного ПВХ – Power Cable Protection Pipe, модифицированного ПП – Modified PP Cable Protective Pipe (Hangzhou Yingtong Technology Co., Ltd).

Невозможно не остановиться на «научно-популярном» объяснении автора понятия «термостойкости» с помощью зажигалки [8]. «Когда инженеру любого уровня показывают термостойкую трубу, то он сразу достаёт зажигалку и говорит: «Сейчас мы проверим, какая она термостойкая...». Очевидно, происходит некоторая путаница в понятиях с огнестойкостью – горючестью изделия, которые никоим образом не связаны с интервалом плавления полимерного материала. Чтобы не polemизировать с автором относительно понимания терминологии, на рис. 2 представим оригинальные результаты оценки плавления ПЭ и ПП трубных марок.

Диапазон плавления всех ПЭВП практически одинаков, также близки значения температуры размягчения по Вика. В иссле-



ДСК-термограмма для образцов:

Рис. 2

- |  |  |
|--|--|
| 1 – ПЭ 80 Лукотен F3802B ( $T_{\text{пл}} = 130,78^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Вика}}$ при 10 Н = 120–125 $^{\circ}\text{C}$ ); | 4 – ПЭ 63 ( $T_{\text{пл}} = 134,55^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Вика}}$ при 10 Н = 130 $^{\circ}\text{C}$ );                      |
| 2 – ПЭВП сшитый РЕХ-а ( $T_{\text{пл}} = 132,08^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Вика}}$ при 10 Н = 124,5 $^{\circ}\text{C}$ );      | 5 – ПЭ 100 Eltex TUB 121 N6000 ( $T_{\text{пл}} = 134,37^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Вика}}$ при 10 Н = 128 $^{\circ}\text{C}$ ); |
| 3 – ПЭВП PE-RT Dowlex 2388 ( $T_{\text{пл}} = 131,98^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Вика}}$ при 10 Н = 124,5 $^{\circ}\text{C}$ ); | 6 – ПП Eltex TUB 350 ( $T = 168,32^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{Вика}}$ при 10 Н = 159 $^{\circ}\text{C}$ );                       |

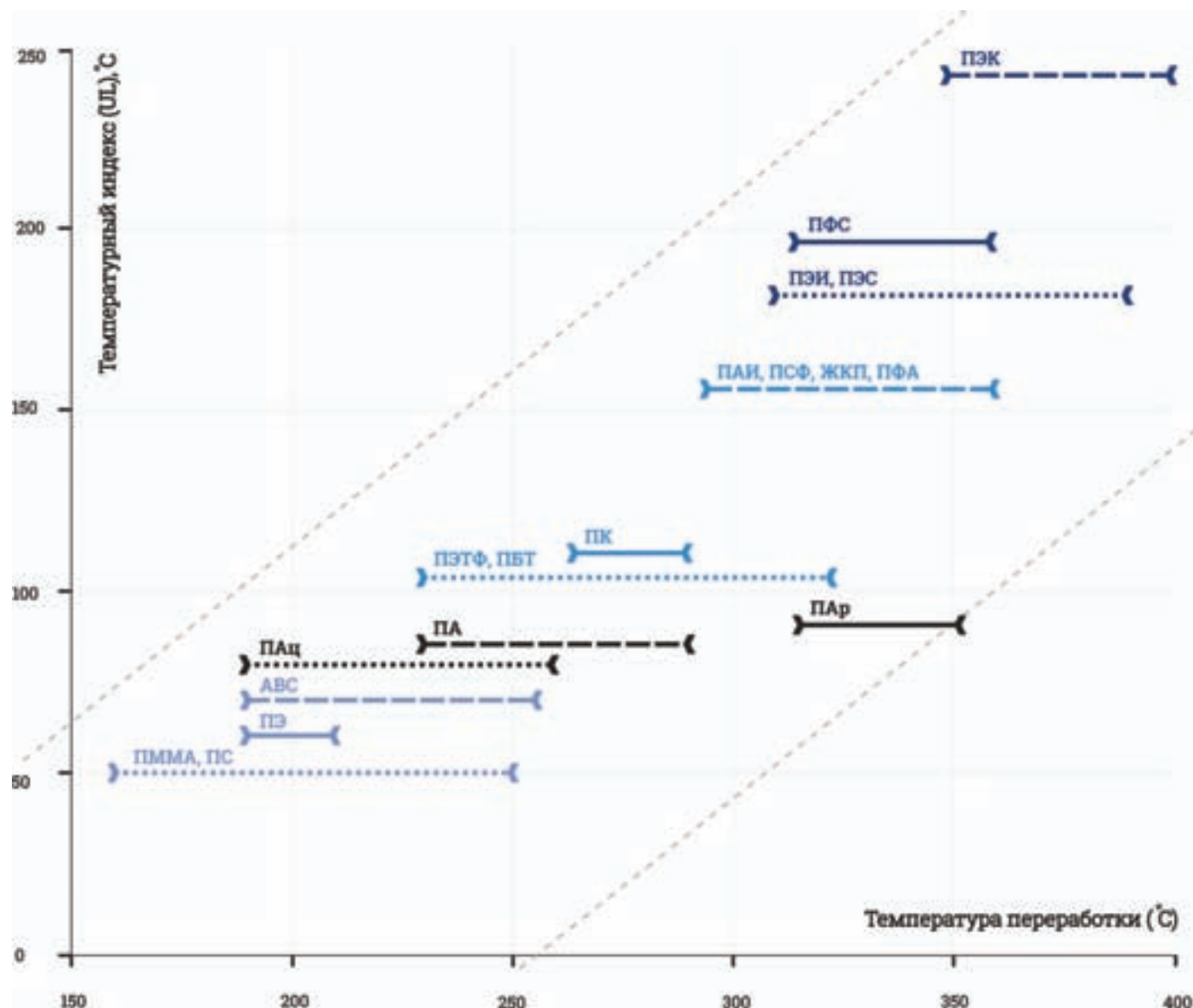
дованном ряду полимеров только ПП характеризуется более высокой температурой плавления и, соответственно, температурой размягчения по Вика. Температура размягчения по Вика характеризует теплостойкость полимеров – верхний температурный предел их эксплуатационных возможностей [14, с. 58 и 155].

Под термостойкостью полимеров понимают их способность сохранять химическое строение при повышенной температуре [14, 15, с.569]. Чаще для полиолефинов (ПЭ и ПП), имеют в виду термоокислительную стабильность [11], оцениваемую по величине индукционного периода окисления при температурах 200 или 210 $^{\circ}\text{C}$ , что напрямую коррелирует с содержанием антиоксидантов в рецептуре. Термостойкость – показатель, характеризующий температурный интервал длительной работоспособности материалов в изделиях. Верхняя температурная граница длительной эксплуатации материала в изделиях определяется по температурным индексам UL, как показано на схеме (рис.3), где демонстрируется связь между температурным интервалом переработки (термической стабильности химической структуры) и интервалом температур эксплуатации.

Способы повышения термостойкости – расширение интервала работоспособности полимерного материала – на сегодняшний день достаточно полно изучены. В случае полиолефинов: для ПЭ – это сшивка и наполнение, для ПП – наполнение.

В табл. 2 представлены сравнительные характеристики трубных марок ПЭ и ПП, материала трубы ProtectorFlex и специального ПКМ «Группы ПОЛИПЛАСТИК».

Анализ технической информации не позволяет выявить каких-либо преимуществ материала трубы ProtectorFlex по сравнению с ПЭ 100 или PE-RT. Только специальная рецептура наполненной композиции трубы ЭЛЕКТРОПАЙП МДПЭ тип 2 SDR 17-200x11,9 ТУ 2248-033-73011750-2014 характеризуется более высокой теплопроводностью  $\lambda_{\text{эф}} = 1,0 \pm 0,2$  Вт/м·К и деформационной теплостойкостью под нагрузкой 0,45 МПа, равной  $T_{\text{изг}} = 85^{\circ}\text{C}$ . Судя по величине этих теплофизических характеристик, специальная наполненная композиция трубы ЭЛЕКТРОПАЙП значительно превосходит по работоспособности традиционно используемые ПЭВП, материал трубы ProtectorFlex и даже трубные марки ПП.



**Рис. 3** Характеристика полимеров согласно температурным индексам UL [12]

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Криваткин А.М., Сакуненко Ю.И. Тепло рассеивающие пластмассы – вызов алюминию. – Полупроводниковая светотехника. 2010. №1. С.54–56.
- 2 Волков Д. П., Успенская М. В. Теплопроводность наполненных полимеров. – Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 4. С. 49–51.
- 3 Никитин Д.А., Лиопо В.А., Никитин А.В., Струк В.А. Компьютерные модели теплопроводности композиционных систем. – MIF 2004: Труды V Минского международного форума по тепломассообмену. Минск: ГНУ ИТМО им. А.В. Лыкова НАНБ, 2004. С. 206–215.
- 4 Чердынцев В. В., Бойков А. А. Теплопроводность полимерных нанокompозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полисульфона. – Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 4 (17). С. 1–8.
- 5 Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш., Мушенко В.Д. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями. – Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 571–575.
- 6 Дмитриев М.В. Требования к трубам для прокладки силовых кабельных линий. – КАБЕЛЬ-news. № 6, 2014. С. 22–26.



\*по данным сайта производителя [13]

Наименование показателя	Метод испытания по стандарту	ПЭВП ПЭ 80 (Лукойл F3802B)	ПЭВП ПЭ 63	ПЭВП ПЭ400 (ТУ812106000)	ПЭВП PE-RT (Dowlex2388)	ПП (ТУ8350)	Protector Flex*	ПКМ
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	ГОСТ 15139-69	949	960	959	941	908	-	1434
Теплопроводность, Вт/м К	ISO 22007-2.2	0,41-0,44	0,47	0,50	0,45	0,27	0,49	0,8 1,0x1,2
ТВика при 10 Н, не менее, °С	ГОСТ 15098-83	120-125	130	128	124,5	159	125	128
Температура изгиба при нагрузке 0,45 МПа	ISO 75	-	69	59	60	106	-	85
Термостабильность (мин) при 200°C	ISO 11357	-	>20	-	>60	>120	-	>60
Термостабильность (мин) при 210°C		>20	-	>20	65	113	-	>60
Твердость по Шару D, не менее	ГОСТ 263-75	55	59	65	61,4	55	61	66
Модуль упругости при изгибе, МПа	ГОСТ 4648	680	746	600	368	1440	650	1530
Модуль упругости при растяжении, МПа		800	863	696	670	1450	640	1919
Предел текучести при растяжении, МПа		20,4	30,4	22,7	23,6	32,0	20,5 - 21,7	17,5
Относительное удлинение при пределе текучести, %	ГОСТ 11262	10,8	13,5	10,1	14,5	9,0	-	17,5
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа		-	12,7	17,2	30,9	14,0	37	11,2
Относительное удлинение при разрыве, %		>600	34,9	>350	912	-	250	10,8

**Таблица 2** Свойства трубных марок ПЭ и ПП, материала труб ProtectorFlex и ПКМ с повышенным коэффициентом теплопроводности

- 7 Дмитриев М.В., Овсянникова А.Ю. О полиэтиленовых трубах для прокладки кабельных линий. – Электроэнергия. Передача и распределение. № 2, 2015. С. 60–63.
- 8 Дмитриев М.В. Полимерная труба как важнейший элемент кабельной системы 6–500 кВ. – Электроэнергия. Передача и распределение. № 6 (33), 2015. С. 78–83.
- 9 Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Тепловой расчет. – Новости электротехники. №4 (82), 2013. С. 2–6.
- 10 Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полимерных трубах. Пропускная способность. – Новости электротехники. №5 (95), 2015. С. 46–49.
- 11 ИСО 11357. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК).
- 12 Modern Plastics Encyclopedia. – N.Y.: McGraw-Hill, Inc., 1980, pp.160–189.
- 13 Технические характеристики труб ProtectorFlex [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://protectorflex.ru/harakteristiki>
- 14 Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Госхимиздат, 1963, 528 с.
- 15 Химический энциклопедический словарь под ред. И.Л.Кнунянц. М.: Советская Энциклопедия, 1983, 790 с.