

УДК 519.653

А. В. Лешок¹, кандидат технических наук,
И. Л. Козловский², кандидат технических наук, доцент,
В. Н. Тарасик³,

Д. А. Ционенко⁴, кандидат физико-математических наук, доцент,
И. В. Дубень⁵, кандидат технических наук, доцент

^{1, 2, 3}Общество с дополнительной ответственностью «Евролиния», пер. Козлова, 7А, 220037 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 344 56 42, eurolinia@mail.ru

⁴ Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 344 56 42, tsiond@tut.by

⁵ Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республики Беларусь, +375 (163) 64 06 73, duben_i_v@mail.ru

СТРУКТУРА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ КЕРАМИКО-ПОЛИМЕРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДЯЩЕЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПАСТЫ

В работе обоснован выбор керамико-полимерной теплопроводящей диэлектрической пасты, который обеспечивает повышение коэффициента теплопроводности и существенное улучшение электроизоляционных свойств по отношению к пастам, в структуре которых присутствуют диэлектрические частицы наполнителя только одной фракции. Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований, связанные с анализом технологических свойств пасты КПТД-4.

Ключевые слова: теплопроводность; термическое (тепловое) сопротивление; композиционные материалы (композиты); эластичные диэлектрические материалы; теплопроводящие пасты.

Рис. 5. Библиогр.: 6 назв.

A. V. Leshok¹, PhD in Technical Sciences,
I. L. Kozlovsky², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. N. Tarasik³,

D. A. Tsionenko⁴, PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,
I. V. Duben⁵, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

^{1, 2, 3}ALC “Eurolinia”, 7A Kozlova Ave., 220037 Minsk, the Republic of Belarus,
 +375 (17) 344 56 42, eurolinia@mail.ru

⁴Institution of Education “Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics”, 6 P. Brovki Str., 220013 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 344 56 42, tsiond@tut.by

⁵Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225401 Baranavichy, the Republic of Belarus, +375 (163) 64 06 73, duben_i_v@mail.ru

STRUCTURE AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF HIGH-VISCOSITY CERAMIC-POLYMER THERMALLY CONDUCTIVE DIELECTRIC PASTE

The work justifies the choice of composition for a ceramic-polymer thermally conductive dielectric paste, which ensures an increase in thermal conductivity and a significant improvement in electrical insulation properties compared to pastes whose structure contains dielectric filler particles of only one fraction. The results of experimental and theoretical research related to the analysis of the technological properties of CPTCD-4 paste are presented.

Key words: thermal conductivity; thermal (heat) resistance; composite materials; elastic dielectric materials; heat-conducting pastes.

Fig. 5. Ref.: 6 titles.

Введение. Современное оборудование машиностроительного производства, радиоэлектронные системы контроля и управления технологическими процессами, системы обработки, передачи и хранения информации характеризуются высокой энергонасыщенностью. При этом решение задачи, связанной с отводом тепловой энергии, выделяющейся в узлах

и элементах оборудования, приобретает особую актуальность. Важными элементами системы терморегуляции силовых установок и электронных систем управления являются теплопроводящие элементы, к которым предъявляются все более жесткие технологические требования, связанные как с обеспечением малого термического сопротивления, так и с рядом других технологических характеристик. Одним из решений, связанных с отводом тепла, является применение теплопроводящих паст.

Теплопроводящие пасты должны:

- обеспечивать эффективный отвод тепла от источника к приемнику;
- гарантировать требуемое значение диэлектрической прочности;
- не изменять микрогеометрию поверхности источника и приемника тепла при монтаже за счет пластической деформации микровыступов с образованием следов абразивного воздействия;
- не оказывать коррозионного воздействия на контактные поверхности;
- иметь длительный ресурс работы за счет минимальной потери массы органической связи;
- эффективно наноситься на поверхность и легко деформироваться с приложением усилия;
- не изменять свои физико-механические свойства в процессе эксплуатации (к примеру, снижать вязкость, которая может привести к ее растеканию).

Объектом исследования являются технологические характеристики керамико-полимерной теплопроводящей диэлектрической (далее — КПТД) пасты, разработанной и внедренной в производство многопрофильной производственной группой компаний «Номакон—Евролиния» (Минск, Республика Беларусь).

Цель работы — определение структуры пасты КПТД-4, обеспечивающей удовлетворение указанных выше технологических требований на основе экспериментальных и теоретических исследований, связанных с анализом ее свойств.

Материалы и методы исследования. Состав и структура теплопроводящего композита определяется в первую очередь дисперсным составом компонентов, объемной долей частиц и их пространственным расположением.

В соответствии с моделью [1] при увеличении объемной доли частиц наполнителя вплоть до критического значения, равного 0,524 для структур с кубической симметрией и 0,7405 для плотноупакованных структур, тепловое сопротивление образца должно резко возрастать. Оно должно приближаться к максимальному значению, которое характеризует элементарную ячейку композита [1; 2], и определяться только формой частиц наполнителя и коэффициентами теплопроводности чистого материала, связующего и чистого материала наполнителя. В рамках предложенной модели [1] рассматривается идеальная структура композита: сферические частицы наполнителя имеют одинаковый размер и расположены в узлах кубической решетки. При таких условиях максимальное значение эффективного коэффициента теплопроводности композита, используемого при производстве теплопроводящих прокладок, которое достигается при минимальном объемном содержании связующего в виде низкомолекулярного кремнийорганического полимера ($\lambda_{св} = 0,12 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$) и наполнителя в виде сферических частиц оксида алюминия ($\lambda_{св} = 40 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$), $\lambda_{пр} = 9,095 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$. При производстве теплопроводящей пасты обеспечение упругих свойств не требуется [2], количество связующего может быть уменьшено по сравнению с указанным выше критическим значением. Тогда при соприкосновении поверхностей частиц наполнителя ее эффективный коэффициент теплопроводности при условии однородности структуры $\lambda_{п} = 7,576 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Полученные в рамках модели результаты являются несколько завышенными, поскольку в реальных композитах размеры частиц существенно отличаются друг от друга и частицы не располагаются в узлах периодической структуры. Даже незначительное отклонение в размерах частиц приводит к тому, что в некоторых областях композита будут возникать прослойки связующего или воздушные промежутки между частицами наполнителя, толщина которых существенно превосходит рассчитанную толщину, являющуюся при

равномерном распределении частиц в связующем минимальной [1]. Увеличение толщины прослойки между элементарными ячейками приводит к резкому уменьшению коэффициента теплопроводности.

Для описания отклонения структуры композита от идеальной в разработанной модели вводится корректирующий множитель, который учитывает отклонение в структуре композита от идеальной кубической или плотноупакованной (гексагональной или кубической гранецентрированной).

Размеры сферических частиц наполнителя в исследуемом образце являются случайными величинами и могут принимать значения в определенном диапазоне $[d_{\min}, d_{\max}]$. Пример распределения сферических частиц со средним диаметром $d_{\text{ср}} = 100$ мкм, полученного с использованием лазерного анализатора, показан на рисунке 1.

В качестве величины 3σ , определяющей интервал, в который укладываются 99,7 % всех частиц согласно закону нормального распределения, можно выбрать значение $3\sigma = d_{\text{ср}} / 2$, где $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр сферических частиц наполнителя. Учтем далее координационное число $n = 6$ для каждого узла в кубической решетке. Это значит, что когда частицы имеют различные размеры, то возможно смещение частиц малого размера относительно центра элементарной ячейки в каждом из шести направлений. Эффективное отклонение от идеальной структуры вводится по формуле

$$\delta_{\text{эф}} = \frac{\sigma}{n-1} = \frac{d_{\text{ср}}}{2 \cdot 3(6-1)} = \frac{d_{\text{ср}}}{30}.$$

Если композит является слабонаполненным, т. е. ширина прослоек связующего Δa будет больше, чем возможное отклонение частиц от узлов кубической решетки $\delta_{\text{эф}}$, то неидеальность структуры не влияет на теплопроводность. В этом случае для расчета коэффициента теплопроводности может применяться методика, разработанная в [1].

Для высоконаполненных композитов коэффициент теплопроводности определяется дефектами структуры. Так, если толщина прослоек связующего Δa между элементарными ячейками, построенными для частиц среднего размера $d_{\text{ср}}$, будет меньше, чем эффективное отклонение $\delta_{\text{эф}}$, то для расчета необходимо ввести корректирующий множитель. Значение корректирующего множителя выбирается на основе сравнения результатов расчета по модели с результатами измерений, и максимальное значение эмпирического корректирующего множителя выбирается $K_{\text{кор}} = 4$. При этом корректирующий множитель должен изменяться в зависимости от соотношения между толщиной прослоек связующего Δa и значением эффективного отклонения $\delta_{\text{эф}}$. В результате значение корректирующего коэффициента определим формулой

$$K_{\text{кор}} = \begin{cases} 1 & \text{при } \Delta a > \delta_{\text{эф}}; \\ T(\Delta a, \delta_{\text{эф}}) & \text{при } \delta_{\text{эф}} \geq \Delta a > 0; \\ 4 & \text{при } \Delta a = 0; \end{cases}$$

$$T(\Delta a, \delta_{\text{эф}}) = 1 + 9 \left(\frac{\Delta a}{\delta_{\text{эф}} - \Delta a} \right)^2 - 6 \left(\frac{\Delta a}{\delta_{\text{эф}} - \Delta a} \right)^3.$$

График зависимости корректирующего множителя от массовой доли наполнителя (сферические частицы) представлен на рисунке 2.

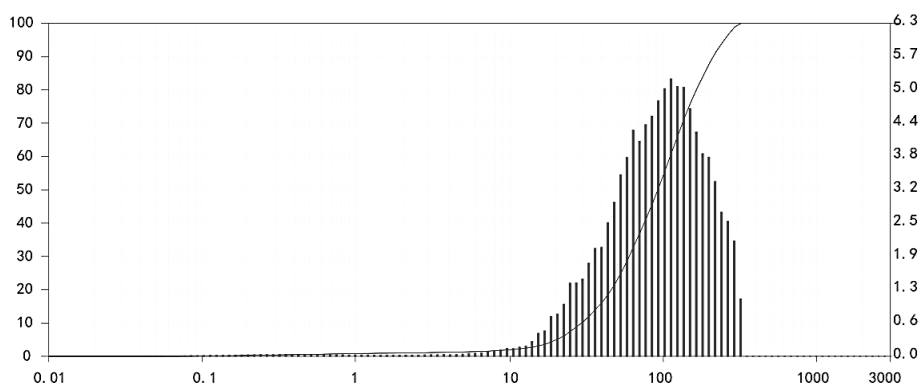


Рисунок 1. — Распределение сферических частиц наполнителя по размерам (гистограмма, шкала справа) и интегральная характеристика распределения (синяя линия, шкала слева) [3]

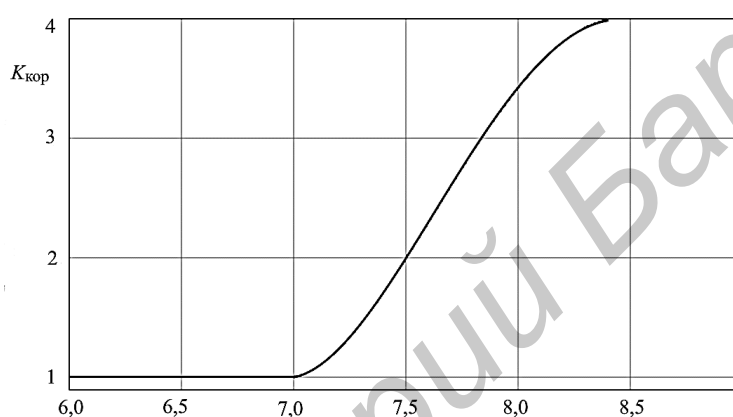


Рисунок 2. — Зависимость корректирующего множителя от массовой доли связующего, %

Увеличение коэффициента теплопроводности композита определяется минимизацией толщины прослоек связующего между частицами наполнителя. Этого можно добиться в случае, когда размеры сферических частиц композита отличаются на величину, меньшую $\delta_{эф}$. Однако обеспечение малого разброса в размерах частиц наполнителя является сложной технологической задачей. К тому же, поскольку толщина прослоек связующего мала, изделия в виде прокладок из такого материала будут хрупкими. Следовательно, используя подход, связанный с обеспечением малой толщины прослоек связующего, можно добиться больших значений коэффициента теплопроводности, но это приведет к потере эластичности и повышению вязкости материала.

Существует способ увеличения теплопроводности композита, связанный с увеличением коэффициента теплопроводности связующего. Как было установлено в [1], этого можно добиться, используя в качестве связующего не чистый полимер, а ненасыщенный композит с частицами наполнителя, размеры которых во много раз меньше, чем у частиц основной фракции. Этот подход к созданию материалов КПТД может обеспечить высокие значения коэффициента теплопроводности и позволит сохранить эластичность.

В этом случае толщина прослоек связующего должна быть достаточной, чтобы компенсировать различие в размерах частиц наполнителя как для крупной, так и мелкой фракции. Структура такого композита является ненасыщенной. При распределении размеров частиц наполнителя с $3\sigma = d_{cp} / 2$ необходимая толщина прослойки связки между элементарными ячейками должна быть равна среднему радиусу сферических частиц наполнителя: $\Delta a_{min} = d_{cp} / 2$ (м). Ширина дополнительного слоя композита, добавляемого к каждой грани элементарной ячейки, построенной вокруг частицы наполнителя, $\Delta a_0 = \Delta a_{min} / 2 = d_{cp} / 4$. При

этом следует учесть, что частицы мелкой фракции помещаются непосредственно в полимерную связку, а частицы крупной фракции — в ненасыщенный композит из полимера и мелких частиц. Чтобы малые частицы композита не мешали перемещению частиц основной фракции при перемешивании суспензии, их диаметры должны быть меньше, чем диаметры крупных частиц, как минимум в 7 раз, но оптимальным отношением средних диаметров крупных и мелких частиц будет отношение, меньшее 10.

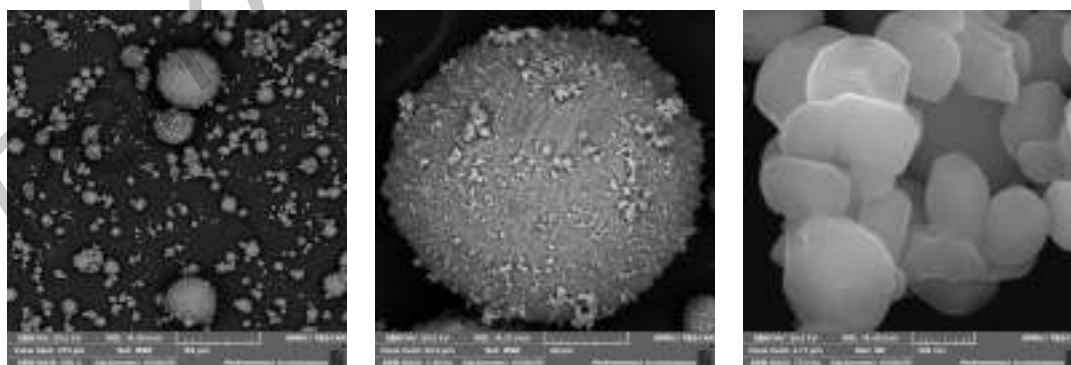
Обеспечение технологических свойств теплопроводящей пасты связано с минимизацией теплового сопротивления и повышением диэлектрической прочности.

Известно, что получение идеально сопрягаемых поверхностей со стопроцентной площадью контакта невозможно. Контакт осуществляется на микроуровне по выступам и впадинам, в которых присутствует воздух, имеющий коэффициент теплопроводности $0,025 \dots 0,035 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$, что значительно меньше, чем у наиболее применимых в качестве радиаторов меди и алюминия — $390 \dots 400$ и $200 \dots 230 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение. На основании методики, предложенной аккредитованной лабораторией ОДО «Евролиния», разработана и внедрена в производство высоковязкая теплопроводящая паста КПТД-4. Она обладает коэффициентом теплопроводности, равным $7,0 \dots 7,3 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$, близким к максимально достижимому в рассматриваемых условиях значению $\lambda_{\text{п}} = 7,576 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$.

Повышение эффективности отвода тепла при использовании данной пасты достигается за счет применения керамических порошков (рисунок 3, а) с оптимизированным гранулометрическим составом высокой степени чистоты. Крупнодисперсные порошки обеспечивают требуемое значение диэлектрической прочности, мелкодисперсные — заполнение объемов микровпадин. Отличительной особенностью состава высоковязкой пасты является применение крупного (см. рисунок 3, б) и мелкого (см. рисунок 3, в) порошков сферической формы, обеспечивающей максимальную плотность укладки и формирование наибольшего количества межчастичных контактов.

Применение мелкодисперсного порошка размером до 500 нм позволяет заполнить микровпадины на поверхности источника и радиатора (рисунок 4). Это приводит к формированию модифицированного слоя на поверхности, обладающего рядом положительных свойств. Во-первых, слой снижает количество воздушных полостей с низким коэффициентом теплопроводности. Во-вторых, поверхностный слой повышает механические свойства, минимизируя изменение топологии поверхностного слоя при нанесении и удалении слоя теплопроводящей пасты, в которой содержатся крупнодисперсные твердые керамические частицы.



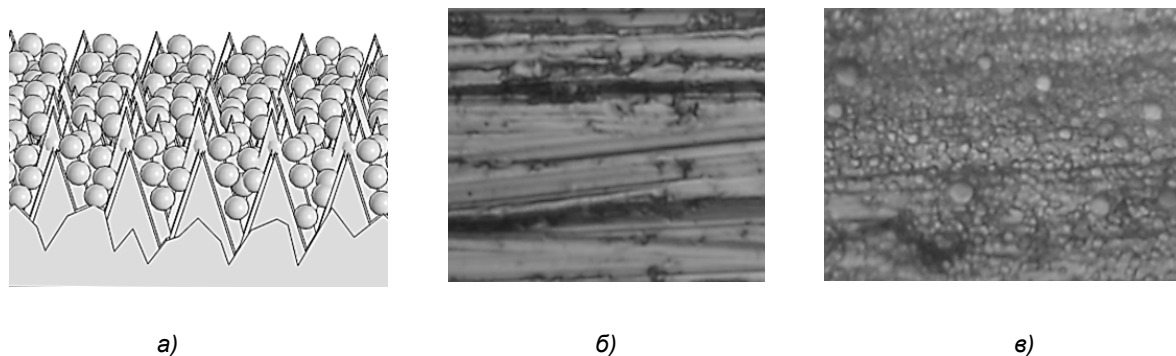
а)

б)

в)

а — оптимизированный гранулометрический состав; б — частицы крупной фракции;
в — частицы мелкой фракции

Рисунок 3. — Используемые порошки в высоковязкой теплопроводящей пасте КПТД-4



а — пространственная модель; б — фотография поверхности радиатора до нанесения пасты (увеличение $\times 600$); в — фотография поверхности радиатора с нанесенной пастой (увеличение $\times 600$)

Рисунок 4. — Образование модифицированного слоя на поверхности при нанесении пасты КПТД-4

Пробивное напряжение, измеренное согласно стандартному методу испытаний напряжения диэлектрического пробоя и диэлектрической прочности твердых электроизоляционных материалов на промышленных частотах [4], составляет не менее 3 кВ при толщине слоя 1 мм.

Важным свойством является вязкость теплопроводящей пасты и сохранение ее технологических свойств при эксплуатации, а также коррозионная стойкость. Определение вязкости рассматриваемых материалов осуществлялось методом пенетрации — путем измерения глубины проникновения конуса в исследуемый материал согласно [5], которая составила сотые доли миллиметра. Отличительной особенностью разработанного состава высоковязкой теплопроводящей пасты КПТД-4 является повышение вязкости с 186...189 до 199...203 МПа · с в интервале температур 20...50 °С при последующем снижении в интервале температур 50...90 °С до значений вязкости при комнатной температуре (рисунок 5). Стабильность вязкости пасты с повышением температуры позволяет применять ее при вертикальном расположении источника и приемника тепла, когда необходимо исключить ее вытекание при нагреве.

В качестве полимерного связующего в высоковязкой теплопроводящей пасте используется низкомолекулярный кремнийорганический полимер, отличительной особенностью которого является низкое количество летучих веществ. Это позволяет использовать его в течение длительного времени, исключая «высыхание», при котором между контактными поверхностями источника и приемника тепла остаются керамические частицы, между которыми располагается воздух.

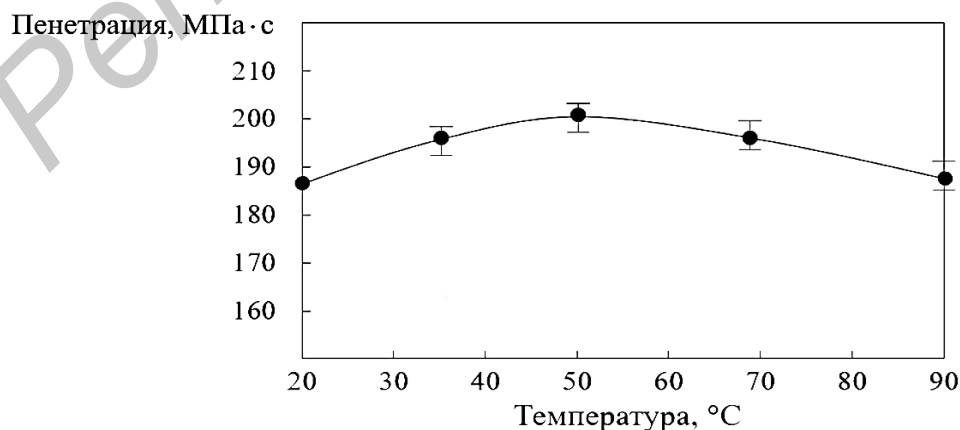


Рисунок 5. — Зависимость пенетрации высоковязкой теплопроводящей пасты КПТД-4 от температуры

Оценка коррозионного воздействия высоковязкой теплопроводящей пасты КПТД-4 на медную и алюминиевую поверхности осуществлялась согласно [6]. Установлено, что паста не оказывает коррозионного действия на медную и алюминиевую поверхности, отсутствуют очаги коррозии, потускнения, места потери блеска и участки с цветами побежалости.

Заключение. Паста КПТД-4 повышенной вязкости, теплопроводности и диэлектрической прочности, произведенная из мелкодисперсных порошков оксида алюминия с рекомендуемым составом и связующего в виде низкомолекулярного кремнийорганического полимера, рекомендуется к применению в случаях, когда необходимо обеспечить отсутствие вытекания пасты и выделения летучих веществ. Паста обеспечивает длительный срок службы без замены, в том числе в присутствии вибрационных нагрузок и условиях химически агрессивной среды.

Список цитируемых источников

1. Козловский, И. Л. Методика для расчета коэффициента теплопроводности композиционных материалов / И. Л. Козловский, Д. А. Ционенко // *Электроника: Наука. Технологии. Бизнес.* — 2024. — Вып. 2. — С. 53—61. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.233.2.62.68.
2. Анализ механических и теплопроводящих свойств керамико-полимерных диэлектрических материалов / В. Н. Тарасик, И. Л. Козловский, Д. А. Ционенко, А. В. Лешок // *Электроника: Наука. Технологии. Бизнес.* — 2024. — Вып. 8. — С. 34—38. DOI: 10.22184/1992-4178.2024.239.8.94.100.
3. JINGXIN JL-1177 Automatic Laser particle sizer measurement range 0.02 μ m-2000 μ m [website]. — NBChao.Com, 2012—2024. — URL: <https://en.nbchao.com/p/9048> (date of access: 10.09.2025).
4. ASTM D149-20. Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies [website]. — ASTM International, 1996—2025. — URL: <https://store.astm.org/d0149-20.html> (date of access: 10.09.2025).
5. ASTM D217-21a. Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease [website]. — ASTM International, 1996—2025. — URL: <https://store.astm.org/d0217-21a.html> (date of access: 10.09.2025).
6. Изделия электронной техники. Метод оценки коррозионной стойкости : ГОСТ 27597-88. — Взамен ГОСТ 9.076-77 ; введ. 01.07.1989. — М. : Стандартинформ, 2006. — 19 с.

Поступила в редакцию 14.10.2025.