

Мухаметшина Елнара Сулудин

канд. техн. наук., доцент
ФГБОУ ВО «Казанский Государственный
Энергетический Университет», г. Казань

Ваганов Михаил Сергеевич

магистрант
ФГБОУ ВО «Казанский Государственный
Энергетический Университет», г. Казань

ВЛИЯНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА

Аннотация: В работе исследовано влияние органических и минеральных наполнителей на диэлектрические свойства композиций на основе поливинилхлорида (ПВХ). В качестве наполнителей использованы гидролизный лигнин и отходы литейного производства, а для придания пластичности диоктилфталат. Измерения проводились с использованием диэлектрического спектрометра, анализировались параметры: диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь и удельное объемное сопротивление.

Ключевые слова: поливинилхлорид (ПВХ), диэлектрические свойства, органические наполнители, минеральные наполнители, композиционные материалы.

Современное развитие электротехнической и кабельной промышленности предъявляет всё более жёсткие требования к материалам, используемым в качестве диэлектриков и изоляционных покрытий. Поливинилхлорид (ПВХ) остаётся одним из наиболее востребованных полимеров благодаря своей технологичности, хорошим механическим и диэлектрическим характеристикам, а также низкой стоимости. Однако, в целях улучшения эксплуатационных свойств ПВХ-композиций всё чаще применяется модификация структуры материала путём введения различных функциональных добавок и наполнителей.

Особый интерес в последние годы вызывает использование техногенных отходов – как органического, так и минерального происхождения – в качестве наполнителей. Это не только снижает себестоимость материалов и позволяет утилизировать промышленные отходы, но и в ряде случаев приводит к улучшению или селективному изменению диэлектрических характеристик. Такие подходы соответствуют современным тенденциям устойчивого развития и замыкания технологических циклов.

Научная значимость настоящего исследования заключается в экспериментальной оценке влияния органических и минеральных наполнителей на комплекс диэлектрических свойств ПВХ-композиций, как жестких, так и пластифицированных. Полученные результаты позволяют глубже понять механизмы межфазного взаимодействия в полимерных системах, а также определить оптимальные концентрации наполнителей для создания материалов с заданными электрофизическими характеристиками. Это открывает перспективы для разработки новых композиционных материалов, адаптированных к конкретным условиям эксплуатации в электротехнике и смежных отраслях.

В исследовании рассматриваются композиции на основе поливинилхлорида, для которых оценивали, как включение различных наполнителей отражается на -диэлектрическом поведении материала. Изучались три ключевые величины: относительная диэлектрическая проницаемость ϵ , тангенс угла потерь $\tan \delta$ и удельное объемное сопротивление ρ_v .



Матрицей служил ПВХ марки С-7059–7058М, стабилизированный смесью стеарата кальция и силиката свинца (по 3 части на 100 частей полимера). Для придания пластичности добавляли диоктилфталат (10–50 мас. ч. на 100 мас. ч. ПВХ).

В роли дисперсных присадок использовали:

- органические – гидролизный лигнин (побочный продукт гидролизного производства);
- минеральные – отходы литейного цеха, образующиеся при литье по выплавляемым моделям.

Измерения проводились на диэлектрическом спектрометре «NOVOCONTROL CONCEPT». Сводные результаты для жёстких и пластифицированных образцов, демонстрирующие изменение электрических характеристик при введении органических и минеральных наполнителей, приведены в таблицах 1–3 [1–3].

Таблица 1.

Диэлектрические свойства жестких композиций

Рецептуры композиций	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Удельное объемное сопротивление, Ом·см
ПВХ	1,82	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{11}$
ПВХ+1 ОЛП	1,82	$7,90 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{11}$
ПВХ+3 ОЛП	1,80	$7,46 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{11}$
ПВХ+5 ОЛП	1,80	$7,45 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{11}$
ПВХ+10 ОЛП	1,78	$7,19 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{11}$
ПВХ+20 ОЛП	1,88	$7,52 \cdot 10^{-3}$	$9,98 \cdot 10^{10}$
ПВХ+30 ОЛП	2,12	$8,13 \cdot 10^{-3}$	$9,91 \cdot 10^{10}$

Таблица 2.

Диэлектрические свойства жестких композиций

Рецептуры композиций	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Удельное объемное сопротивление, Ом·см
ПВХ	1,82	$7,91 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{11}$
ПВХ+1 ГЛ	1,82	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$1,87 \cdot 10^{11}$
ПВХ+3 ГЛ	2,20	$8,46 \cdot 10^{-3}$	$1,80 \cdot 10^{11}$
ПВХ+5 ГЛ	2,80	$8,86 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{11}$
ПВХ+10 ГЛ	3,14	$9,09 \cdot 10^{-3}$	$9,83 \cdot 10^{10}$
ПВХ+20 ГЛ	3,28	$9,79 \cdot 10^{-2}$	$9,51 \cdot 10^{10}$
ПВХ+30 ГЛ	3,68	$9,96 \cdot 10^{-2}$	$9,19 \cdot 10^{10}$

Таблица 3.

Диэлектрические свойства пластифицированных композиций

Рецептуры композиций	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Удельное объемное сопротивление, Ом·см
ПВХ+3 ГЛ+10 ДОФ	2,82	$7,93 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{11}$
ПВХ+3 ГЛ+30 ДОФ	2,80	$5,46 \cdot 10^{-2}$	$1,01 \cdot 10^{10}$
ПВХ+3 ГЛ+50 ДОФ	3,86	$7,81 \cdot 10^{-2}$	$5,15 \cdot 10^9$
ПВХ+10 ГЛ+10 ДОФ	2,14	$8,59 \cdot 10^{-3}$	$8,43 \cdot 10^{10}$



ПВХ+10 ГЛ+30 ДОФ	2,80	$6,14 \cdot 10^{-2}$	$9,03 \cdot 10^9$
ПВХ+10 ГЛ+50 ДОФ	3,68	$7,52 \cdot 10^{-2}$	$5,61 \cdot 10^9$
ПВХ+30 ГЛ+10 ДОФ	2,24	$8,62 \cdot 10^{-3}$	$8,06 \cdot 10^{10}$
ПВХ+30 ГЛ+30 ДОФ	3,30	$6,14 \cdot 10^{-2}$	$7,67 \cdot 10^9$
ПВХ+30 ГЛ+50 ДОФ	3,09	$6,45 \cdot 10^{-2}$	$7,79 \cdot 10^9$

Исследование, проведённое в 2023 году, показало, что добавление лигноцеллюлозных наполнителей, таких как отруби и гранулы из кукурузных початков, в изотактический полипропилен приводит к увеличению диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Это объясняется наличием полярных групп в структуре лигноцеллюлозы, способствующих ориентационной поляризации и межфазной поляризации из-за различий в проводимости между матрицей и наполнителем [4].

Добавление бария титаната (BaTiO_3) в ПВХ-композиции приводит к значительному увеличению диэлектрической проницаемости. При содержании 30% BaTiO_3 диэлектрическая проницаемость увеличивается с 7.6 до 16.1. Это связано с высокой диэлектрической проницаемостью самого BaTiO_3 и его взаимодействием с ПВХ-матрицей [5].

В другом исследовании использование в качестве наполнителя вольфрамит (CaSiO_3) показало улучшение диэлектрических свойств ПВХ-композиций, что делает их перспективными для применения в высоковольтных изоляционных материалах [6].

Комбинирование глинистых минералов, таких как галлуазит, с лигнином приводит к улучшению механических и диэлектрических свойств ПВХ-композиций. Такие гибридные наполнители обеспечивают лучшее распределение в матрице и способствуют увеличению модуля упругости, что может быть полезно для создания материалов с заданными свойствами [7].

Анализ полученных данных показал, что для жестких композиций на основе ПВХ При введении инертного литейного порошка (ОЛП) электрические свойства изменялись неравномерно: зависимости имели выраженный экстремум. Максимальный разрыв с эталонными значениями обнаружен при дозировке порядка 10 частей на 100 частей полимера, что указывает на существование наилучшей, «рабочей» концентрации наполнителя.

Использование гидролизного лигнина приводило лишь к незначительному ухудшению диэлектрических показателей относительно чистого ПВХ. Причину видят в специфической химической архитектуре лигнина – природного полимера, насыщенного функциональными группами, способными вступать во взаимодействие с матрицей и тем самым влиять на её электрическое поведение.

Для образцов, содержащих диоктилфталат, прослеживается чёткая тенденция: чем выше суммарное количество и пластификатора, и наполнителя, тем крупнее относительная проницаемость ϵ и тангенс угла потерь $\text{tg } \delta$, тогда как объёмное сопротивление ρ_v уменьшается.

Таким образом, современные исследования подтверждают значительное влияние как органических, так и минеральных наполнителей на диэлектрические свойства ПВХ-композиций. Использование гибридных наполнителей и функционализация их поверхности открывают новые возможности для создания материалов с улучшенными характеристиками. Дальнейшие исследования в этом направлении помогут разработать ПВХ-композиты с заданными свойствами для различных технических применений.

Список литературы:

1. Мухин А.М., Галимов Э.Р., Шibaков В.Г. Технологические и эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе поливинилхлорида // Вестник Казанского технического университета им. А.Н. Туполева, №4, вып.2, 2012. – С. 47-51.



2. Мухин А.М., Галимов Э.Р., Макарова Н.А. Влияние дисперсных наполнителей на диэлектрические свойства ПВХ композиций // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики», – Казань: КНИТУ им. А.Н. Туполева, 2013. – С. 25-27.
3. Галимов Э.Р. Процессы структурообразования и формирования свойств при модификации поливинилхлорида. – Казань, Отечество, 2014. – 161 с.
4. Cerovic, D.D.; Petronijevic, I.M.; Marinkovic, F.S.; Maletic, S.B.; Popovic, D.M. Dielectric Properties of Isotactic Polypropylene with Lignocellulose-Based Biomass Filler. *Materials* 2025, 18, 1657. <https://doi.org/10.3390/ma18071657>
5. Uddin, S.; Akhtar, N.; Bibi, S.; Zaman, A.; Ali, A.; Althubeiti, K.; Alrobei, H.; Mushtaq, M. Effect of BaTiO₃ on the Properties of PVC-Based Composite Thick Films. *Materials* 2021, 14, 5430. <https://doi.org/10.3390/ma14185430>
6. Yaacob, M.M., Kamaruddin, N., Mazlan, N.A. et al. Dielectric Properties of Polyvinyl Chloride with Wollastonite Filler for the Application of High-Voltage Outdoor Insulation Material. *Arab J Sci Eng* 39, 3999–4012, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-0996-8>
7. Tomaszewska, J.; Wieczorek, M.; Skórczewska, K.; Klapiszewska, I.; Lewandowski, K.; Klapiszewski, Ł. Preparation, Characterization and Tailoring Properties of Poly (Vinyl Chloride) Composites with the Addition of Functional Halloysite–Lignin Hybrid Materials. *Materials* 2022, 15, 8102. <https://doi.org/10.3390/ma15228102>

