06

Электрофизические свойства углеродсодержащих композитов с полиэтиленовой матрицей

© А.М. Зюзин, К.Е. Игончeнкова

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Саранск, Россия
e-mail: zyuzin.am@rambler.ru

Поступило в Редакцию 3 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 8 июля 2026 г.
Принято к публикации 1 сентября 2026 г.

Исследовано влияние содержания технического углерода (ТУ) и частоты на эффективную диэлектрическую проницаемость ε' и диэлектрические потери в композитах на основе матрицы из полиэтилена высокой плотности. Установлено, что при увеличении содержания ТУ от 0 % до 25 %, происходит нелинейное возрастание ε'. Такое поведение объясняется усилением взаимного влияния электрических дипольных моментов, порождаемых индукционными зарядами, возникающими в частицах ТУ и их агломератах под действием внешнего электрического поля. При этом в интервале концентраций 0 %–15 %, который соответствует участку до точки перколяции, возрастание ε' не сопровождается увеличением $\mathrm{tg}\,\delta$. Обнаружено наличие максимума тангенса угла потерь в композитах с концентрацией ТУ $\nu = 20\,\%$, при которой доминирующий вклад в проводимость обусловлен полевой эмиссией электронов с поверхности частиц ТУ с последующим туннелированием. Установлено, что при такой концентрации композитам присуща также специфика частотных зависимостей ε' и $tg\delta$.

Ключевые слова: полимерные композиты, эффективная диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, полиэтилен высокой плотности, технический углерод.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64185.92-26

Введение

Изучению физических свойств полимерных композитов, наполненных мелкодисперсными частицами электропроводящих материалов, в том числе частицами технического углерода (ТУ, англ. CB (carbon black)), посвящено большое количество работ [1–5]. В качестве наиболее значимых функциональных характеристик таких композитов, кроме физико-механических, представляются такие как электропроводность σ, эффективная диэлектрическая проницаемость ε' и тангенс угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\,\delta$. Важное значение имеют частотные зависимости перечисленных характеристик. Для ряда применений необходимо, чтобы композит обладал повышенной диэлектрической проницаемостью ($\varepsilon \geq 5$) и низкими диэлектрическими потерями [6–8]. С другой стороны, представляет большой интерес изучение особенностей диэлектрических потерь в полупроводящих композитах в связи с поиском материалов для защиты от электромагнитного излучения, которые обладали бы не просто отражающей, а высокой поглощающей способностью энергии электромагнитных волн. Если в непроводящих или слабопроводящих диэлектриках механизмы диссипации энергии изучены достаточно подробно, то в полупроводящих материалах, к числу которых относятся полимерные композиты, наполненные техническим углеродом, такие механизмы исследованы недостаточно. Данная задача предоставляет также практический интерес в связи с использованием кабельных сетей, в том числе высоковольтных для передачи данных [9]. Конструкция высоковольтных силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией, как известно, включает две электропроводящие экранные оболочки, наличие которых приводит к дополнительным диэлектрическим потерям по сравнению с только лишь полимерной изоляцией без экранов. Широкое применение в диагностике изоляции и выявлении ее деградации, которая наиболее выражена в диапазоне высоких частот, находит высокочастотная диэлектрическая спектроскопия. Поэтому изучение свойств электропроводящих композитов представляется актуальной задачей.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния содержания технического углерода в широком диапазоне концентраций, а также частоты на эффективную диэлектрическую проницаемость ε' и диэлектрические потери в композитах на основе матрицы из полиэтилена высокой плотности (HDPE). Кроме того, одна из задач работы состояла в выявлении механизма формирования диэлектрических потерь вблизи порога перколяции.

1. Эксперимент

Исследования проводились на образцах композитов, наполненных техническим углеродом ТУ марки С40, размер частиц (глобул и агрегатов) которого составляет 20–60 nm [10]. В качестве матрицы использовался полиэтилен HDPE BL 6200. Композиты получали путем сме-

шивания в расплаве с помощью лабораторного экструдера EX-30. Затем путем прессования изготавливали пластины размерами 150×150 mm и толщиной $1-1.5$ mm, из которых вырезались диски диаметром 20 mm для измерений ε' и $\operatorname{tg}\delta$ и полоски 8×100 mm для измерения проводимости σ. Измерения сопротивления при постоянном напряжении, по значениям которого и размерам образца рассчитывалась электрическая проводимость, производили: в высокоомных образцах с малым содержанием ТУ (5 mass%$-$15 mass%) — с помощью прибора Megger MIT1025; в низкоомных, с содержанием ТУ (20 mass%$-$35 mass%) — с помощью RIGOL DM3058. При регистрации вольт-амперных характеристик (ВАХ) низкоомных образцов, с целью исключения их нагрева, применялось напряжение в форме прямоугольных импульсов, создаваемых с помощью высоковольтного электронного ключа. Емкость C и $\operatorname{tg}\delta$ в диапазоне частот $50-10^6$ Hz определяли с помощью измерителя иммитанса E7-20 в комплекте с измерительной ячейкой, имеющей круглые электроды диаметром $D = 20$ mm и толщиной 1.5 mm. Для устранения влияния возможных неконтролируемых воздушных прослоек наносилась серебряная проводящая паста. При измерениях C и $\operatorname{tg}\alpha$ на образцы со стороны электродов прикладывалось давление 20 N/cm^2. Учитывалось влияние краевых эффектов и паразитной емкости измерительной ячейки с подводящими проводниками. Значения ε' рассчитывали, как $\varepsilon' = C_x \cdot d/(\varepsilon_0 \cdot S)$, где d — толщина образца, S — площадь электродов, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m. Использовалась параллельная эквивалентная схема замещения образца диэлектрика. Для проверки воспроизводимости результатов, а также для оценки погрешности, измерения проводили на $3-5$ образцах для каждой концентрации ТУ. На приведенных ниже рисунках значения средней квадратичной погрешности соответствуют геометрическим размерам символов, обозначающих экспериментальные значения.

Определение диэлектрической проницаемости полупроводящих материалов является непростой задачей, особенно когда в образце возникает сквозная проводимость. В настоящей работе емкость, по значениям которой определялась действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости ε', измерялась по трем схемам: первый вариант — при непосредственном контакте электродов с образцом; во втором варианте, для исключения влияния тока сквозной проводимости, между образцом и каждым из электродов конденсатора помещались тонкие, толщиной $15\,\mu$m, изолирующие пленки из полиэтилентерефталата или две (с целью обеспечения идентичности условий) такие же пленки, сложенные вместе и помещенные лишь с одной стороны образца (вариант 3) [11,12]. Конфигурация расположения, подобная третьему варианту, имеет место при функционировании электропроводящей композитной экранной оболочки высоковольтного силового кабеля, где она находится между токоведущим проводником и изоляционным слоем.

Для второго и третьего вариантов измерений C, емкость конденсатора с образцом и изолирующими пленками C_e можно рассматривать как емкость двух последовательно соединенных конденсаторов:

1) содержащего лишь плотно прилегающий к электродам исследуемый образец емкостью C_x;

2) содержащего только две пленки и трудно контролируемые воздушные прослойки, емкостью C_i. Такие прослойки могут вносить существенную погрешность в результаты измерений [13], особенно тонких образцов или образцов с большим значением диэлектрической проницаемости ε'. Для такой системы можно записать

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_x} + \frac{1}{C_i}, \quad \text{откуда} \quad C_x = C_e\left(1 + \frac{C_e}{C_i - C_e}\right).$$

Поскольку, как показано в [11], в композитах с проводимостью $\sigma \geq 10^{-3}\,\Omega^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$, имеет место отклонение экспериментальной зависимости емкости конденсатора от толщины образца от расчетной, значение ε' определяли для случая минимальной толщины образца ($d = 1.0$ mm). В качестве параметров, характеризующих диэлектрические потери, использовались тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ и коэффициент диэлектрических потерь (мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости) ε''. Как показано в [14], $\operatorname{tg}\delta$ является более чувствительной характеристикой потерь по сравнению с коэффициентом потерь $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg}\delta$, но для анализа, конечно, целесообразно использовать и ε'', поскольку в ряде случаев, наоборот, ε'' оказывается более чувствительным параметром.

2. Результаты и их обсуждение

Зависимости действительной части эффективной диэлектрической проницаемости ε' и тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta$ от содержания ТУ для трех вариантов измерений на частотах 50, 10^3 и 10^6 Hz представлены на рис. 1. Видно, что в диапазоне концентраций 0 %$-$20 % ТУ зависимости как $\varepsilon'(\nu)$, так и $\operatorname{tg}\delta(\nu)$ для всех вариантов измерений практически совпадают. С увеличением ν происходит возрастание ε', при этом зависимость $\varepsilon'(\nu)$ является не линейной, а имеет более резкий характер. Как следует из рис. 1, значения $\operatorname{tg}\delta$ при увеличении ν от 0 % до 15 % остаются сравнительно малыми и практически неизменными. Данный результат свидетельствует о том, что фаза дрейфовых токов, обусловленных смещением массива электронов в пределах частиц ТУ (микротоков), приводящих к возникновению индукционных зарядов, обусловливающих электрические дипольные моменты частиц, опережает фазу прикладываемого электрического поля на $\pi/2$. Отметим, что значение проводимости σ при увеличении ν от 0 % до 15 % также существенно не изменяется. Это иллюстрирует рис. 2, из которого также следует, что экспериментальная зависимость $\sigma(\nu)$ хорошо согласуется с рассчитанной согласно классической

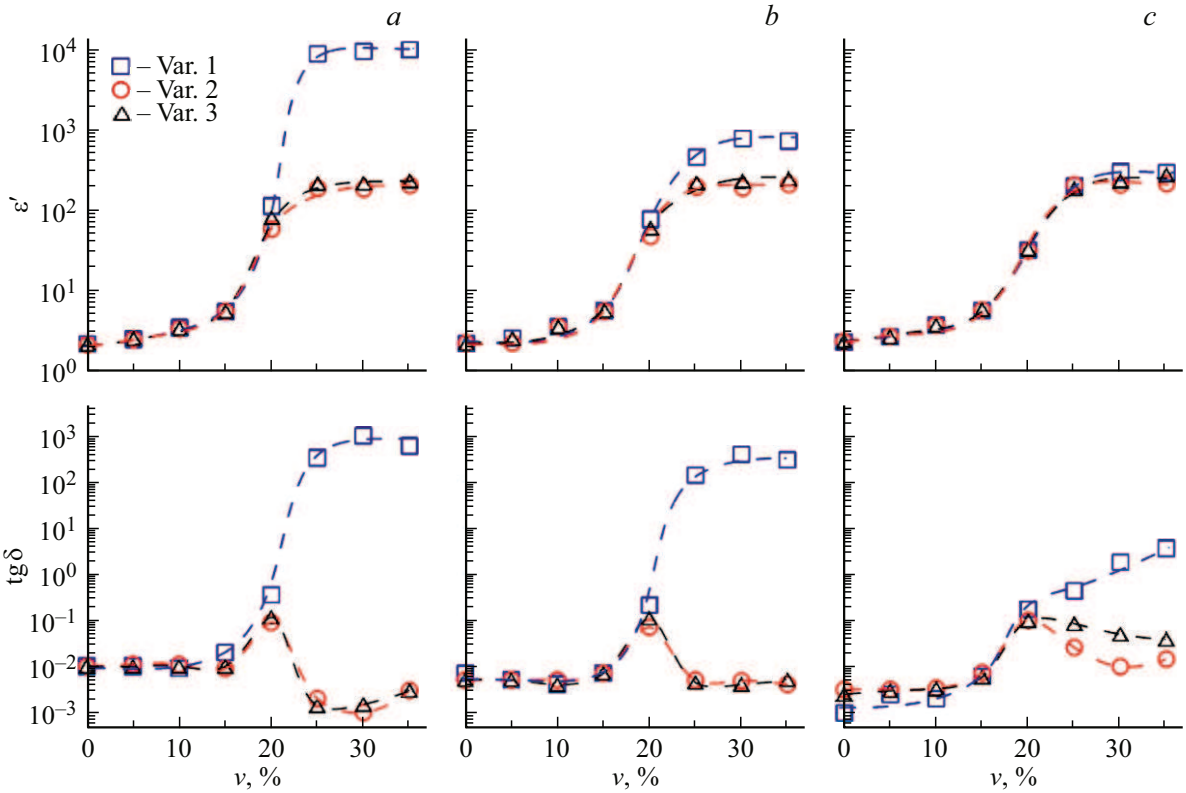


Рис. 1. Зависимость ε' и $\mathrm{tg}\,\delta$ от содержания v технического углерода для трех вариантов измерений на частотах: a — 50, b — 10^3, c — 10^6 Hz.

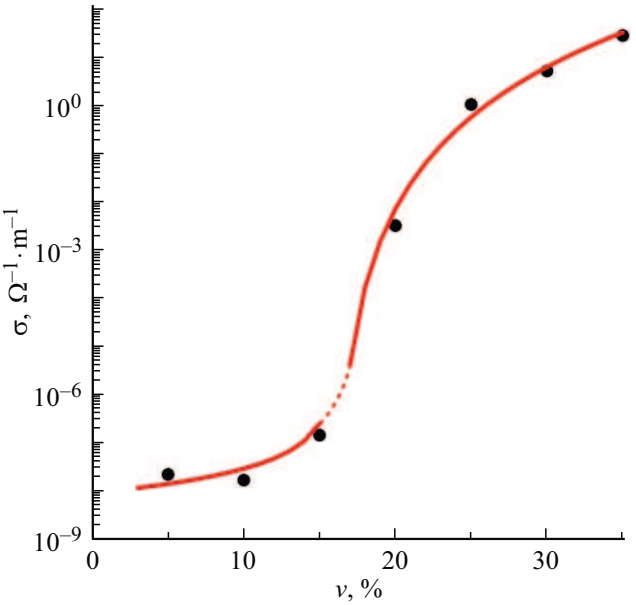


Рис. 2. Зависимость проводимости σ от содержания v технического углерода в композитах; кружки — эксперимент, линия — расчет согласно теории перколяции [1].

теории перколяции [1]:

$$\sigma = \sigma_1(v - v_c)^t, \quad \text{для} \quad v > v_c,$$

$$\sigma = \sigma_2(v_c - v)^{-s}, \quad \text{для} \quad v < v_c,$$

где v — содержание наполнителя, v_c — порог перколяции, σ_1 и σ_2 — проводимость композита в проводящем и диэлектрическом состояниях соответственно, $t = 5.4$ и $s = 1.2$ — критические параметры для исследуемой серии композитов. Увеличение v с 15% до 20% (диапазон, входящий в область перколяции) приводит во всех вариантах измерений к резкому, примерно на порядок, возрастанию ε', что коррелирует с характером изменения проводимости σ. При этом столь же резко возрастают значения $\mathrm{tg}\,\delta$, и также для всех вариантов измерений, а во втором и третьем вариантах наблюдается максимум. Увеличение содержания ТУ до 25% приводит к дальнейшему росту ε'. После этого резкое возрастание ε' прекращается, и зависимость $\varepsilon'(v)$ в интервале $v = 25\%–35\%$ выходит практически на плато. Значения $\mathrm{tg}\,\delta$ для второго и третьего вариантов измерений уменьшаются, причем на частотах 50 и 10^3 Hz до значений, ниже или примерно соответствующих значениям $\mathrm{tg}\,\delta$ для концентраций 0%–15%. На частоте $f = 10^6$ Hz во втором и третьем вариантах измерений, также происходит уменьшение $\mathrm{tg}\,\delta$, хотя и не такое заметное, как на частотах 50 и 10^3 Hz. Наблюдаемое поведение $\mathrm{tg}\,\delta(v)$ соответствует тому, что при содержании ТУ 25%–35% фаза дрейфового тока (уже макротока, поскольку макроскопическая проводимость достаточно высока), приводящего к возникновению индукционных зарядов в приповерхностных слоях образца [11], так же

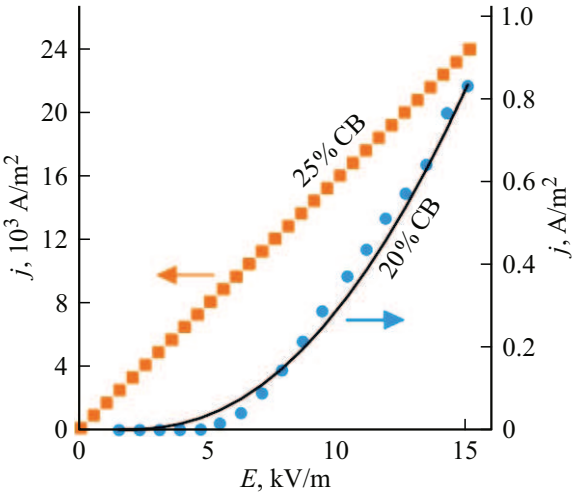


Рис. 3. ВАХ для композитов с $\nu = 20\,\%$ и $25\,\%$; символы — эксперимент; линия — расчет согласно соотношению Фаулера–Нордгейма.

как и фаза микротоков для $\nu = 0\,\%{-}15\,\%$, опережает фазу электрического поля на $\pi/2$. В первом варианте на частоте 10^6 Hz зависимость $\mathrm{tg}\,\delta(\nu)$ претерпевает трансформацию, выраженную в резком изменении угла наклона при $\nu = 20\,\%$.

Резкое возрастание потерь и возникновение максимума $tg\delta$ при концентрации $20\,\%$ ТУ, близкой к порогу перколяции ($\nu_c \approx 16\,\%$), определенному с помощью вышеприведенных соотношений для $\sigma(\nu)$, можно объяснить следующим. При данной концентрации расстояние между частицами достигает таких значений (≤ 5 nm), при которых доминирующее влияние на проводимость начинает оказывать механизм, обусловленный полевой эмиссией электронов с поверхности частиц технического углерода с последующим туннелированием между частицами через тонкие слои материала матрицы, в результате чего проводимость резко (на 5 и более порядков) возрастает. Это, в свою очередь, может сопровождаться особой спецификой процессов рассеяния энергии, приводящей к возрастанию потерь. Полевой эмиссии соответствует нелинейная ВАХ, описываемая соотношением Фаулера–Нордгейма [15,16]:

$$j = A\,\frac{E^2}{\varphi}\,\exp\left(-\frac{B\varphi^{3/2}}{E}\right),$$

с которой согласуются данные эксперимента для композита с $\nu = 20\,\%$ ТУ (рис. 3) при значении констант $A = 5.6 \cdot 10^{-9}$ A·eV/V^2, $B = 7.1 \cdot 10^3$ eV$^{2/3}$·V/m, и где E — напряженность электрического поля, а φ — работа выхода электрона. Как следует из рис. 3, хорошее соответствие экспериментальных и расчетных ВАХ позволяет сделать вывод о том, что доминирующим механизмом проводимости при $\nu = 20\,\%$ ТУ является механизм, связанный с полевой эмиссией электронов с последующим туннелированием. Из приведенного соотношения для j следует, что плотность тока, обусловленного полевой эмиссией, возрастает с E. Колебания такого тока будут негармоническими из-за нелинейной ВАХ. Если ограничиться аппроксимацией колебаний в виде первой гармоники, то фаза колебаний этого тока будет близка или равна фазе колебаний приложенного гармонического напряжения, что будет обусловливать дополнительные потери, приводящие к возникновению максимума $\mathrm{tg}\,\delta$. Отметим, что ВАХ композитов с $\nu = 25\,\%$ ТУ (рис. 3), а также с $\nu = 30\,\%$ и $35\,\%$, были линейными.

При увеличении f до 10^6 Hz особенно сильно уменьшаются значения ε' и $\mathrm{tg}\,\delta$ для первого варианта измерений, что связано с существенным уменьшением влияния токов сквозной проводимости с увеличением частоты. Из представленных на рис. 1 результатов следует, что при $\nu = 20\,\%$ и выше, значения ε' и $\mathrm{tg}\,\delta$ в варианте 3 несколько выше, чем в варианте 2. Это можно объяснить влиянием на C_x и $\mathrm{tg}\,\delta$ индукционного заряда, возникающего за счет инжекции электронов с электрода, контактирующего с образцом без изолирующей пленки, и процесса его формирования в приповерхностной области образца.

Наблюдаемую на начальном участке нелинейную зависимость ε' от содержания ТУ можно объяснить следующим. Если исходить из предположения, что электропроводящие частицы ТУ, расположенные в полимерной матрице, имеют форму шара [17] радиуса R, то легко показать [18], что при воздействии внешнего электрического поля E_0 в каждой такой частице возникает электрический дипольный момент (ЭДМ), равный $P_0 = \varepsilon_0 E_0 4\pi R^3 = 3\varepsilon_0 E_0 V$, где V — объем частицы. Поверхностная плотность индукционных зарядов при этом распределена как $\sigma(\theta) = \sigma_0 \cos\theta$, где θ — угол между полем E_0 и выделенным направлением. Величина положительных и отрицательных индукционных зарядов на соответствующих полусферах равна $q = \pm\sigma_0 \pi R^2$, а $\sigma_0 = 3\varepsilon_0 E_0$. При малых концентрациях технический углерод распределен по объему матрицы в основном в виде отдельных частиц, изолированных друг от друга материалом полимерной матрицы. Но по мере увеличения ν уменьшается расстояние между частицами, что приводит к усилению взаимного влияния из-за действия полей, создаваемых индукционными зарядами частиц ТУ. Кроме того, начинают во все большей степени образовываться агломераты, состоящие из двух и более частиц, а также возникают мостики проводимости между ними. Такие изменения начинают не просто пропорционально ν, а существенно по-иному сказываться на характере зависимости поляризованности $P(\nu)$ а, следовательно, и $\varepsilon'(\nu) = (P/\varepsilon_0 E_0) + 1$. В состоянии электростатического равновесия напряженность результирующего поля в любой точке проводящих частиц, в том числе и в точке их соприкосновения, должна быть равна нулю. В результате, электрический дипольный момент агломерата, состоящего, например, из двух соприкасающихся и находящихся между собой в электрическом контакте частиц ТУ, с осью симметрии, параллельной E_0, становится

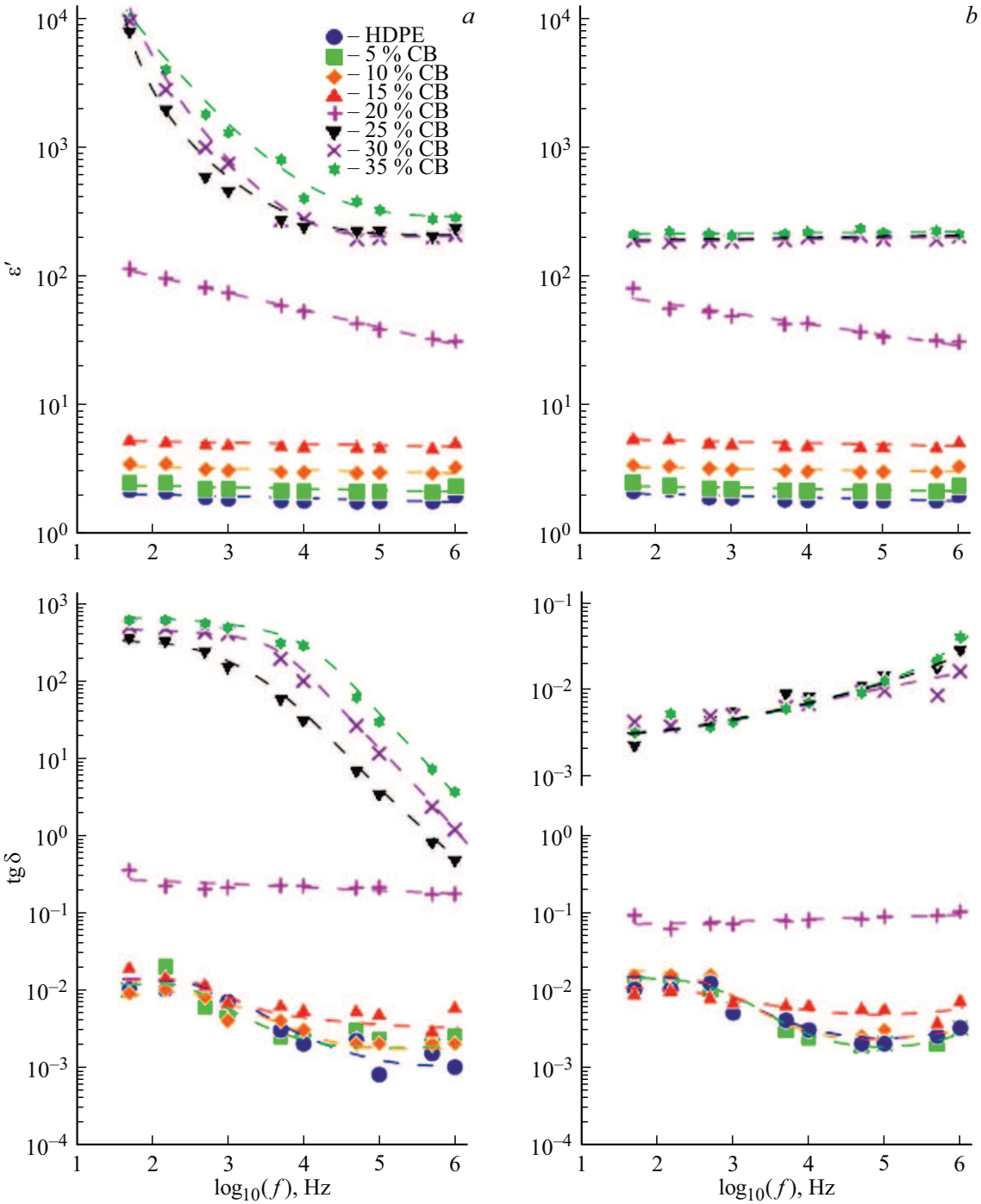


Рис. 4. Частотные зависимости $\varepsilon'(f)$ и $\operatorname{tg}\delta(f)$ композитов с различным содержанием ТУ для *a* — первого, *b* — второго вариантов измерений.

значительно большим суммы ЭДМ двух таких же, но одиночных частиц. Это обусловлено примерно в два раза большим значением σ_0 и также примерно в два раза большим расстоянием между разноименными зарядами на одной и другой частицах. Оси агломератов распределены в матрице однородного композита равновероятно по всем пространственным ориентациям. Тем не менее эффект существенного увеличения электрического дипольного момента в результате образования таких агломератов, а также агломератов, состоящих из большего числа частиц, будет обусловливать не просто пропорциональную, а более резкую, нелинейную зависимость диэлектрической проницаемости от содержания ТУ в составе композита, что и наблюдается в эксперименте. Значительно более медленное возрастание и выход практически на плато зависимости $\varepsilon'(\nu)$ в композитах

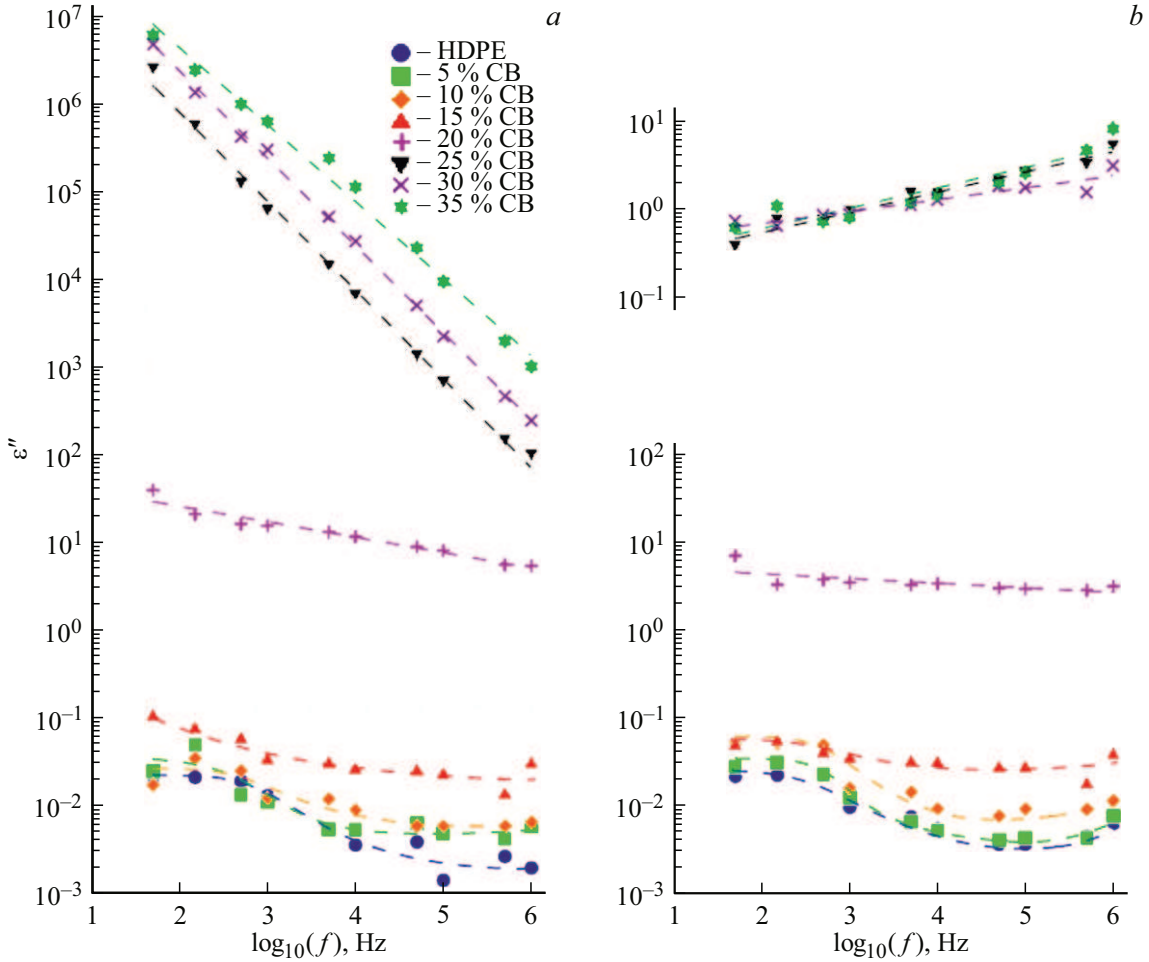


Рис. 5. Зависимости $\varepsilon''(f)$ композитов с разным содержанием ТУ: *a* — первый, *b* — второй варианты измерений.

с $\nu \geq 25\,\%$ ТУ, можно объяснить тем, что, начиная с $\nu = 25\,\%$, проводимость композита становится достаточно высокой. В этом случае доминирующее влияние на величину поляризованности P и ε' начинают оказывать индукционные заряды, возникающие в приповерхностных слоях образца из-за электростатической индукции и установления электростатического равновесия [11]. Поэтому дальнейшее увеличение ν, и соответственно σ уже в значительно меньшей степени сказывается на величинах ε' и $\operatorname{tg}\delta$.

На рис. 4 приведены частотные зависимости $\varepsilon'(f)$ и $\operatorname{tg}\delta(f)$ для композитов с разным содержанием ТУ. Видно, что для композитов с концентрациями $\nu = 0\,\%{-}15\,\%$ происходит лишь небольшое изменение ε' с ростом f, при этом наблюдается заметное уменьшение $\operatorname{tg}\delta$. Увеличение ν до $20\,\%$ приводит к существенному отличию характера зависимостей как $\varepsilon'(f)$ так и $\operatorname{tg}\delta$. Необходимо отметить ярко выраженную особенность. В отличии от композитов с другими концентрациями ТУ, зависимость $\varepsilon'(f)$ для композита с $\nu = 20\,\%$, построенная в логарифмическом масштабе, линейно и весьма существенно спадает с возрастанием f. При этом $\operatorname{tg}\delta(f)$, наоборот, изменяется слабо. Такой характер зависимостей $\varepsilon'(f)$ и $\operatorname{tg}\delta(f)$ имеет место для всех вариантов измерений. В композитах с концентрациями $\nu = 25\,\%{-}35\,\%$ поведение $\varepsilon'(f)$ в варианте 1 в отличие от вариантов 2 и 3 имеет резко спадающий характер в области частот $\sim 50{-}10^4$ Hz, в области $\sim 10^4{-}10^6$ Hz спад $\varepsilon'(f)$ замедляется, и значения ε' становятся примерно такими же, как в вариантах 2 и 3. Зависимости $\operatorname{tg}\delta(f)$ для композитов с $\nu = 25\,\%{-}35\,\%$ в варианте 1 также претерпевают изменения, но здесь, наоборот, вначале при $f = 50{-}10^3$ Hz наблюдается плато, затем происходит уменьшение значений $\operatorname{tg}\delta$ примерно на два порядка. В области частот $10^3{-}10^6$ Hz зависимость $\operatorname{tg}\delta(f)$, построенная для таких композитов в логарифмическом масштабе, является линейной, причем с одинаковым угловым коэффициентом. При увеличении ν от $25\,\%$ до $35\,\%$ и соответственно увеличении проводимости происходит смещение $\operatorname{tg}\delta$ и ε'' в область более высоких значений. В отличие от $\operatorname{tg}\delta(f)$, зависимость $\varepsilon''(f)$ (рис. 5) во всем исследованном диапазоне частот является линейной и хорошо описывается выражением $\varepsilon'' = \sigma/\omega\varepsilon_0$ [19], где ω — угловая частота колебаний

электрического поля. Это соответствует тому, что для композитов с $\nu = 25\%{-}35\%$ доминирующий вклад в потери в варианте измерений 1 связан с токами сквозной проводимости. В вариантах 2 и 3 для композитов с $\nu = 25\%{-}35\%$ ТУ значения $\operatorname{tg}\delta$ близки к значениям $\operatorname{tg}\delta$ для концентраций $\nu = 0\%{-}15\%$. Отличие состоит в том, что для $\nu = 25\%{-}35\%$ с увеличением f происходит возрастание $\operatorname{tg}\delta$. Из сопоставления зависимостей $\operatorname{tg}\delta(f)$ (рис. 4) и $\varepsilon''(f)$ (рис. 5) для композитов с концентрациями ТУ $\nu = 0\%{-}15\%$ следует, что в области частот $f = 10^3{-}10^6$ Hz ε'' является параметром, более чувствительным к содержанию ТУ по сравнению с $\operatorname{tg}\delta$.

Наблюдаемое изменение характера частотных зависимостей $\operatorname{tg}(f)$ и $\varepsilon''(f)$ для композитов с разным содержанием ТУ можно объяснить следующим. Как известно, поглощение энергии в полупроводящем материале при воздействии переменного электрического поля определяют различные механизмы диссипации. С достаточно хорошим приближением диэлектрические потери можно представить в виде суммы трех вкладов [20]:

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_{DC} + \varepsilon''_{M-W} + \varepsilon''_{D} = \varepsilon'(\operatorname{tg}\delta_{DC} + \operatorname{tg}\delta_{M-W} + \operatorname{tg}\delta_{D}),$$

где $\varepsilon''_{DC} = \sigma/\varepsilon_0\omega$ — вклад, обусловленный сквозной проводимостью, ε''_{M-W} — вклад, обусловленный межфазной поляризацией Максвелла–Вагнера, и ε''_{D} — так называемый релаксационно-поляризационный (дэбаевский) вклад. С увеличением ТУ в составе композита диэлектрические потери изменяются сначала за счет влияния межфазной поляризации Максвелла–Вагнера. Это влияние в исследованных композитах является незначительным и более заметно проявляется на высоких частотах. Увеличение содержания ТУ до 25 % и выше приводит к резкому возрастанию σ и, как следствие, резкому возрастанию потерь из-за влияния тока сквозной проводимости, что и наблюдается в первом варианте измерений $\operatorname{tg}\delta$. Из сопоставления приведенных на рис. 4 и 5 результатов следует, что применение двух вариантов измерений позволяет выделить вклад в $\operatorname{tg}\delta$ и ε'', обусловленный сквозной проводимостью.

Кажущиеся противоречивыми более низкие значения $\operatorname{tg}\delta$ для композитов с $\nu = 25\%{-}35\%$, по сравнению с $\nu = 0\%{-}15\%$ в области частот $50{-}10^3$ Hz объясняются более высокими значениями ε' для $\nu = 25\%{-}35\%$, т. е. уменьшение значений $\operatorname{tg}\delta$ для композитов с $\nu = 25\%{-}35\%$ по сравнению с $\nu = 0\%{-}15\%$ происходит в результате значительно большего возрастания компоненты поляризованности, фаза колебаний которой совпадает с фазой поля, по сравнению с компонентой поляризованности, отстающей от фазы поля на $\pi/2$ и определяющей поглощение энергии. Поскольку поглощение определяется значением мнимой части $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg}\delta$ — комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$, значение этой величины для композитов с $\nu = 25\%{-}35\%$ будет выше, чем для композитов с $\nu = 5\%{-}15\%$. Отметим, что плотность мощности диэлектрических потерь $w = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'' \cdot E^2$ определяет именно $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \operatorname{tg}\delta$. Необходимо также отметить, что самое высокое значение ε'', так же как и $tg\delta$, практически во всем исследованном диапазоне частот во втором и третьем вариантах измерений, когда отсутствует влияние тока сквозной проводимости, имеют композиты с содержанием $\nu = 20\%$ ТУ.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Установлено, что при увеличении содержания ТУ от 0 % до $\sim 25\%$ в композите на основе матрицы из полиэтилена высокой плотности, когда доминирующий вклад в поляризованность связан с электрическими дипольными моментами частиц ТУ и их агломератов, приводит к существенному, причем нелинейному, возрастанию диэлектрической проницаемости. При этом в пределах $0\%{-}15\%$ содержания ТУ проводимость и тангенс угла потерь сохраняют малые значения.

2. При концентрациях ТУ $> 20\%$, когда макроскопическая проводимость $\sigma \geq 1\,\Omega^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$, определяющее влияние на значение ε' начинают оказывать индукционные заряды, возникающие в приповерхностных слоях композита в результате установления электростатического равновесия. Этим объясняется и значительно более медленное возрастание ε' в интервале концентраций ТУ $25\% \leq \nu \leq 35\%$.

3. Обнаруженный максимум диэлектрических потерь при $\nu = 20\%$, которая находится вблизи порога перколяции, можно объяснить тем, что доминирующим механизмом, определяющим проводимость при данной концентрации, является механизм, обусловленный полевой эмиссией электронов с поверхности частиц технического углерода с последующим туннелированием. Это, в свою очередь, сопровождается спецификой процессов рассеяния энергии, приводящей к резкому возрастанию потерь. Также при такой концентрации ТУ наблюдается ярко выраженное отличие характера частотных зависимостей как ε', так и $\operatorname{tg}\delta$.

4. Применение вариантов измерений C и $\operatorname{tg}\delta$ с изолирующими пленками и без пленок позволяет выделить вклад, обусловленный сквозной проводимостью, в величину эффективной диэлектрической проницаемости и диэлектрические потери. Установлено, что наибольшее влияние данного вклада наблюдается в области частот $\sim 50{-}10^4$ Hz.

5. Обнаруженное в диапазоне $\nu = 0\%{-}15\%$ изменение ε' от ~ 2.3 до ~ 6 с одновременно сохраняющимися малыми значениями проводимости и диэлектрических потерь позволяет регулировать значение ε', и представляет интерес для практических применений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Э.Р. Блайт, Д. Блур. *Электрические свойства полимеров* (Физматлит, М., 2008)

[2] В.А. Марков, В.А. Гущин, А.В. Марков. Пластические массы, **1**–**2**, 44 (2019). https://www.plastics-news.ru/jour/article/view/341/341

[3] Б.И. Заднепровский, И.Ю. Клюев, В.Е. Турков. Письма в ЖТФ, **42** (16), 87 (2016). https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43587

[4] А.М. Зюзин, А.А. Карпеев, Н.В. Янцен. ЖТФ, **92** (6), 829 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52512.335-21 [A.M. Zyuzin, A.A. Karpeev, N.V. Yanzen. Tech. Phys., **67** (6), 2702 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.06.54416.335-21]

[5] L.X. He, S.C. Tjong. J. Nanosci. Nanotechnol., **11** (5), 3916 (2011). DOI: 10.1166/jnn.2011.3837

[6] В.Ф. Бородзюля, С.В. Мякин, Н.Т. Сударь, Н.Б. Шейко, А.Г. Родионов, М.М. Сычев. ФТТ, **55** (8), 1536 (2013). https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/1123

[7] И.А. Маркевич, Г.Е. Селютин, Н.А. Дрокин, А.Г. Селютин. ЖТФ, **90** (7), 1151 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49450.391-19 [I.A. Markevich, G.E. Selyutin, N.A. Drokin, A.G. Selyutin. Tech. Phys., **65** (7), 1106 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220070129]

[8] J. Macutkevic, D. Seliuta, G. Valusis, R. Adomavicius, A. Krotkus, P. Kuzhir, A. Paddubskaya, S. Maksimenko, V. Kuznetsov, I. Mazov, I. Simonova. Diamond Relat. Mater., **25**, 13 (2012).

[9] С. Щедрин. Компоненты и технологии, **1** (54), 90 (2006). https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15135271

[10] Г.В. Моисеевская, Г.И. Раздьяконова, М.Ю. Караваев, А.А. Петин, Е.А. Стрижак. Каучук и резина, **4**, 24 (2015). https://elibrary.ru/download/elibrary_24052594_79867226.pdf

[11] А.М. Зюзин, К.Е. Игонченкова. ФТТ, **67** (10), 1884 (2025). DOI: 10.61011/FTT.2025.10.61966.230-25

[12] А.М. Зюзин, К.Е. Игонченкова, А.А. Карпеев. Письма в ЖТФ, **51** (10), 40 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.10.60332.20242

[13] В.А. Акзигитов, А.А. Беляев, А.О. Курносов, С.М. Паярель. Труды ВИАМ, **132** (2), 12 (2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-116-128

[14] А.С. Богатин, И.В. Лисица, С.А. Богатина. Письма в ЖТФ, **28** (18), 61 (2002). https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/40568

[15] А.В. Елецкий. УФН, **180** (9), 897 (2010). DOI: 10.3367/UFNr.0180.201009a.0897

[16] А.М. Зюзин, А.А. Карпеев, К.Е. Игонченкова. Письма в ЖТФ, **49** (13), 21 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.13.55731.19565 [A.M. Zyuzin, A.A. Karpeev, K.E. Igonchenkova. Tech. Phys. Lett., **49** (7), 16 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.07.56438.19565]

[17] Е.А. Рогачев, А.А. Каленчук. Омский научный вестник. Серия авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение, **8** (3), 128 (2024). DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-3-128-134

[18] В.А. Алешкевич. *Электромагнетизм* (Физматлит, М., 2014)

[19] W. Zhang, A.A. Dehghani-Sanij, R.S. Blackburn. J. Mater. Sci., **42** (10), 3408 (2007).

[20] Yi. Xi, Yu. Bin, C.K. Chiang, M. Matsuo. Carbon, **45**, 1302 (2007).