

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-9-32-38>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАЗОРОВ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НАГРЕВАЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© **Николай Григорьевич Филиппенко***, **Эмиль Физули-Оглы Фарзалиев**

Иркутский государственный университет путей сообщения «ИрГУПС», Россия, 664075, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15; *e-mail: ifpi@mail.ru

*Статья поступила 21 января 2024 г. Поступила после доработки 20 марта 2024 г.
Принята к публикации 23 мая 2024 г.*

Среди причин браковки изделий из полимерных материалов, изготовленных с использованием ВЧ-электротермии, важное место занимает отсутствие или неточность имеющихся справочных данных по режимам обработки. Неточности таких электрофизических параметров, как тангенс угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) и диэлектрическая проницаемость (ϵ) образуются вследствие неучета влияния зазоров в гранулированных многокомпонентных полимерных материалах и технологической системе, а также за счет субъективных факторов процесса контроля. В работе представлены результаты исследования влияния зазоров технологической системы на электрофизические параметры полимерных и композитных материалов. Исследовали образцы из гранулированных материалов: полипропилен марки «Бимодал» и стабилизирующей добавки «Баско». Материалы применяют для изготовления стойких к ультрафиолетовому воздействию пленок, используемых для упаковки. Показано, что при определении электрофизических параметров полимерных материалов, их многокомпонентных смесей и оптимальной частоты ВЧ-воздействия наиболее приемлем резонансный метод с возможностью использования двух- и трехэлектродной системы. Приведены уточненные (с учетом влияния зазоров) электрофизические данные для исследуемых материалов при электромагнитном воздействии (частота 27,12 МГц) и нагреве до 120 °С. При сравнении полученных данных со значениями показателей без учета влияния зазоров выявлено, что их разница достигает 12 (для $\tan \delta$) и 9 % (для ϵ) от их абсолютной величины. При этом наибольшее влияние на эффективность нагрева оказывает $\tan \delta$. Оптимальная температура нагрева полимеров, при которой $\tan \delta$ достигает максимального значения, составляет 50 °С. Полученные результаты могут быть использованы для повышения качества производимых из широкого ассортимента многокомпонентных полимерных и композитных материалов изделий при оптимизации режимов их электротермической обработки.

Ключевые слова: повышение точности; электрофизические свойства технологические зазоры; высокочастотная сушка; технологические смеси полимеров.

STUDY OF THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL CLEARANCES ON ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF HEATED POLYMER MATERIALS

© **Nikolay G. Filippenko***, **Emil F. Farzaliyev**

Irkutsk State Transport University (IrGUPS), 15, ul. Chernyshevskogo, Irkutsk, 664075, Russia; *e-mail: ifpi@mail.ru

Received January 21, 2024. Revised March 20, 2024. Accepted May 23, 2024.

Among the reasons for the rejection of products made of polymer materials manufactured using HF electrothermy, an important place is occupied by the lack of available reference data on the modes of their

processing. The inaccuracy of some electrical parameters, e.g., the dielectric loss tangent ($\tan \delta$) and the dielectric constant (ϵ) are attributed to neglecting the effect of gaps in granular multicomponent polymer materials or technological system, as well as subjective factors of the control process. We present the results of studying the impact of gaps of a technological system on the electrophysical parameters of polymer and composite materials. We studied samples of granular materials “Bimodal polypropylene” and “Basco” stabilizing additive which are used in production of UV-resistant films for packaging. It is shown that a resonance method with the possibility of using two- and three-electrode system is most appropriate when determining the electrophysical parameters of polymer materials, their multicomponent mixtures and the optimal frequency of exposure. Refined (determined with allowance for gaps) electrophysical data for the materials under study obtained at a frequency of 27.12 MHz and heating to 120°C are presented. Comparison of the results obtained with and without taking into account the impact of gaps revealed that the difference reaches up to 12 (for $\tan \delta$) and 9% (for ϵ) of their absolute value. Note that the parameter $\tan \delta$ has the greatest effect on the heating efficiency. The optimal temperature of polymer heating at which $\tan \delta$ reaches the maximum value is 50°C. The results obtained can be used to improve the quality of products produced from a wide range of multicomponent polymer and composite materials by optimizing the modes of their electrothermal processing.

Keywords: increasing accuracy; electrical properties; technological air gaps; high frequency drying; technological polymer mixtures.

Введение

Эффективность метода диэлектрического нагрева полимерных и композитных материалов и изделий из них при использовании высокочастотного (ВЧ) поля общепризнана [1 – 9]. Тем не менее процент брака изделий, выполненных из полимерных материалов с использованием ВЧ-обработки, достигает 18 % [2 – 5]. Основная причина — отсутствие достоверных данных по показателям электрофизических параметров полимерных материалов, необходимых при выборе оптимальных технологических режимов электротермической обработки.

При выборе режимов ВЧ-обработки изделий из полимеров при организации технологического процесса электротермии применяют такие критерии, как тангенс угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$) и диэлектрическая проницаемость материалов (ϵ). С их помощью рассчитывают удельную мощность ($P_{уд}$), выделяемую нагреваемым полимером (внутренние источники тепла):

$$P_{уд} = 5,53 \cdot 10^{-11} E^2 f \epsilon \tan \delta, \quad (1)$$

где E — напряженность электрического поля; f — частота поля; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость; $\tan \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Отметим, что точное определение $\tan \delta$ и ϵ материала позволяет оптимизировать технологический ВЧ-нагрев, установив режимы обработки с заранее выбранными показателями напряженности электрического поля и его частоты.

В таблице приведены диапазоны частот электротермического оборудования, на рис. 1 — снижение интенсивности выделяемой мощности и глубины проникновения ВЧ-излучения в материал с увеличением частоты.

Видно, что с ростом частоты с 27,12 до 2450 МГц напряженность поля и глубина про-

никновения электромагнитного поля в материал понижаются с 20,74 до 2,18 В/м и с 29,34 до 0,32 м соответственно.

Поскольку полимерные материалы в процессе приготовления многокомпонентных технологических смесей состоят из гранул, зазоры между которыми заполнены воздухом, значимость контроля электрофизических параметров возрастает. Принято считать, что тангенс угла диэлектрических потерь воздуха настолько невелик, что обычно его рассматривают как идеальный диэлектрик — вещество, не поглощающее и не отражающее энергию электромагнитных волн. Однако значение $\tan \delta$ воздуха и тем более воздушной смеси с частицами полимеров и газов, выделяемых ими, зависит от температуры и частоты электромагнитного поля. Показатель диэлектрических потерь может меняться более чем в 3 раза (с 0,0004 до 0,0014), что влияет на динамику нагрева полимера при ВЧ-электротермии.

Учитывая низкую теплопроводность полимеров и их способность менять электрофизические параметры в широких пределах [1, 2, 6], можно заключить, что максимальная скорость ВЧ-нагрева (которая чаще всего в технологических процессах — критерий эффективности) не всегда

Диапазоны частот электротермического оборудования
Frequency ranges of electrothermal equipment

Диапазон частот	f , МГц	Основные применения
ВЧ	$27,12 \pm 0,16$	ВЧ-нагрев
ОВЧ	$40,68 \pm 0,02$	ОВЧ-нагрев
УВЧ	$433,92 \pm 0,87$	УВЧ-нагрев
	866 ± 4	
	915 ± 25	
	2375 ± 50	
СВЧ	2450 ± 50	СВЧ-нагрев

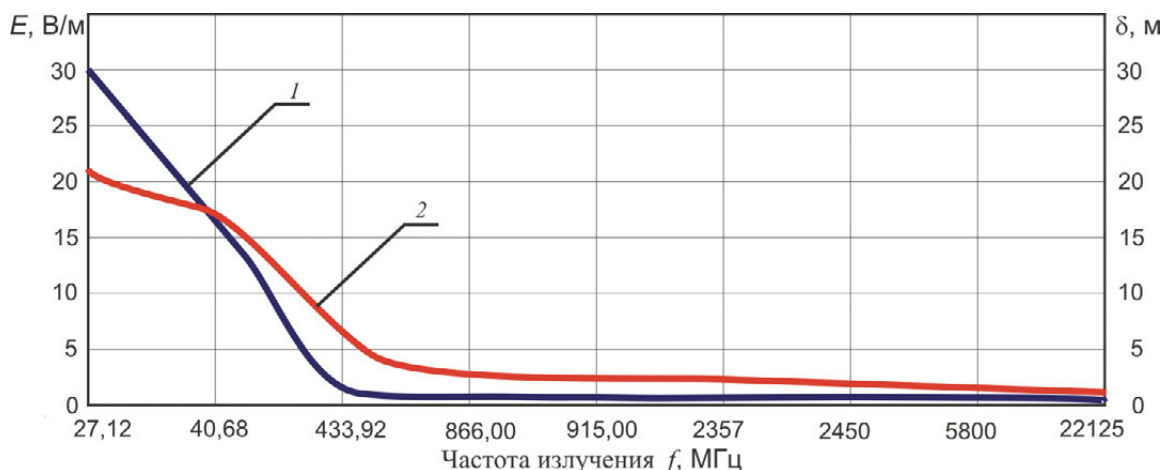


Рис. 1. Частотные зависимости выделяемой мощности E (1) и глубины δ (2) проникновения излучения в полипропилен при ВЧ-нагреве

Fig. 1. Frequency dependences of the emitted power E (1) and the depth δ (2) of radiation penetration into polypropylene during high frequency heating

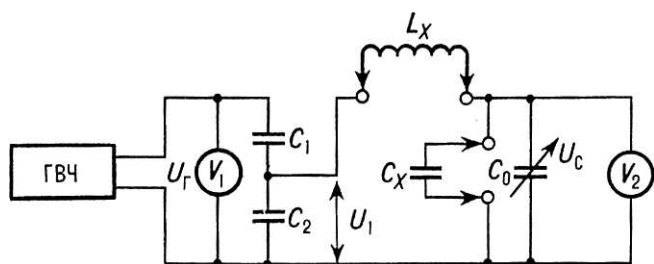


Рис. 2. Принципиальная схема измерителя добротности: ГВЧ — перестраиваемый генератор колебаний высокой частоты; V_i — встроенный вольтметр для контроля уровня выходного напряжения U_r ; C_1 , C_2 — конденсаторы емкостного делителя напряжения; U_i — входное напряжение на измерительном контуре $L_x - C_x - C_0$; V_2 — индикатор резонанса; U_c — напряжение на образцовом конденсаторе C_0 измерительного контура

Fig. 2. Schematic diagram of a quality factor meter: HFG — tunable high-frequency generator; V_i — built-in voltmeter for monitoring the output voltage level U_r ; C_1 , C_2 — capacitors of the capacitive voltage divider; U_i — input voltage on the measuring circuit $L_x - C_x - C_0$; V_2 — resonance indicator; U_c — the voltage on the reference capacitor C_0 of the measuring circuit

приводит к желаемому результату. В ряде случаев такой режим нагрева может привести к локальному перегреву поверхности материала (скин-эффекту) и его разрушению.

Цель работы — исследование влияния зазоров технологической системы на электрофизические параметры полимерных и композитных материалов при определении режимов их электротермической обработки.

Материалы, методика, оборудование

Наряду с существующими способами определения тангенса угла диэлектрических потерь (методы S -параметров, перемещения конденса-

тора, балансного моста) широко применяют резонансный метод, который для измерения диэлектрических характеристик материалов в низко- и высокотемпературных условиях предполагает использование резонаторов [2, 7, 8]. В связи с этим наибольшее распространение при определении электрофизических показателей полимерных материалов получили измерители добротности. Например, Q -метр (модель ВМ-560) прост в использовании, обладает малыми потерями энергии за период колебания (рис. 2).

Для расчета электрофизических параметров материалов предварительно определяют увеличение емкости измерительного конденсатора, обусловленное диэлектриком:

$$C_x = C_1 - C_2, \quad (2)$$

где C_1 , C_2 — емкости измерительного конденсатора без и для контура с образцом.

Относительную диэлектрическую проницаемость материала и тангенс угла диэлектрических потерь вычисляют по формулам:

$$\varepsilon = (C_x d) / (\varepsilon_0 S), \quad (3)$$

где d — расстояние между электродами; $\varepsilon_0 = 1/(36\pi) \cdot 10^{-9}$ — электрическая постоянная; S — площадь электрода;

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 Q_2} \frac{C_1}{C_x}, \quad (4)$$

где Q_1 , Q_2 — запасы энергии колебаний по сравнению с потерями за один период и по сравнению с потерями за один период для контура с об-

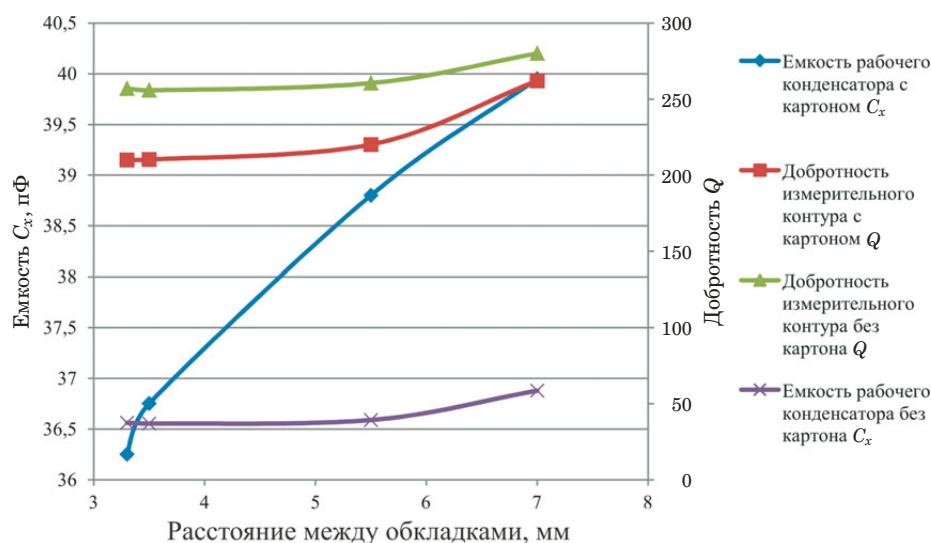


Рис. 3. Зависимости емкости C_x и добротности Q измерительного контура воздушного конденсатора от расстояния между обкладками

Fig. 3. Dependences of the capacitance C_x and Q -factor of the measuring circuit of the air capacitor on the distance between plates

разцом; C_1 — емкость измерительного конденсатора; C_x — увеличение емкости измерительного конденсатора, обусловленное диэлектриком.

Заметим, что, несмотря на ограниченность диапазона генерируемых частот данного оборудования (до 30 МГц), резонансный метод с двухэлектродной системой можно использовать в расширенном диапазоне частот (вплоть до 1 ГГц) [9 – 15]. Кроме того, ряд диапазонов частот, используемых в промышленной электротермии, на которые распространяются нормативные требования по определению электрофизических свойств полимерных материалов, оказываются неохваченными. Использование резонансных методов при измерении электрофизических параметров на частоте 27,12 МГц с применением измерителей добротности не противоречит рекомендуемым требованиям.

Несмотря на использование полимеров в разных отраслях промышленности, основное направление их применения (более 70 %) — упаковка [6, 15 – 19]. Влияние воздушных зазоров на электрофизические параметры полимеров в составе технологической смеси исследовали на образцах, применяемых при производстве упаковочной пленки с повышенными требованиями к ультрафиолетовому воздействию: полипропилен марки «Бимодал» и полимерной стабилизирующей добавки на основе оксида титана марки «Баско». В качестве термоизолирующих прокладок использовали электроизоляционный картон марки ЭВТ (толщина — 0,42 мм). Температурный диапазон нагрева (18 – 120 °C) выбирали в соответствии с технологической операцией электротермической сушки, проводимой при условии

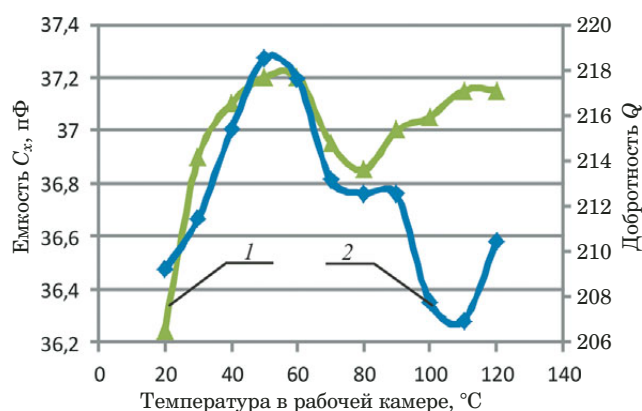


Рис. 4. Зависимости емкости C_x (1) и добротности Q (2) параметров воздушной смеси, находящейся в измерительном контуре, от температуры в рабочей камере при расстоянии между обкладками конденсатора $h = 3,3$ мм

Fig. 4. Dependences of the capacity C_x (1) and the quality factor Q (2) of the parameters of the air mixture in the measuring circuit on the temperature in the working chamber at a distance between the capacitor plates $h = 3.3$ mm

недостижения момента расплава или деструкции используемых материалов.

Обсуждение результатов

Проведенные испытания показали, что на емкость рабочего конденсатора и добротность контура, в которую он включен, основное влияние оказывает картон, входящий в состав технологической системы (рис. 3). Присутствие воздушных зазоров оказывает незначительное воздействие на измеряемые параметры контура, и при постоянной температуре им можно пренебречь.

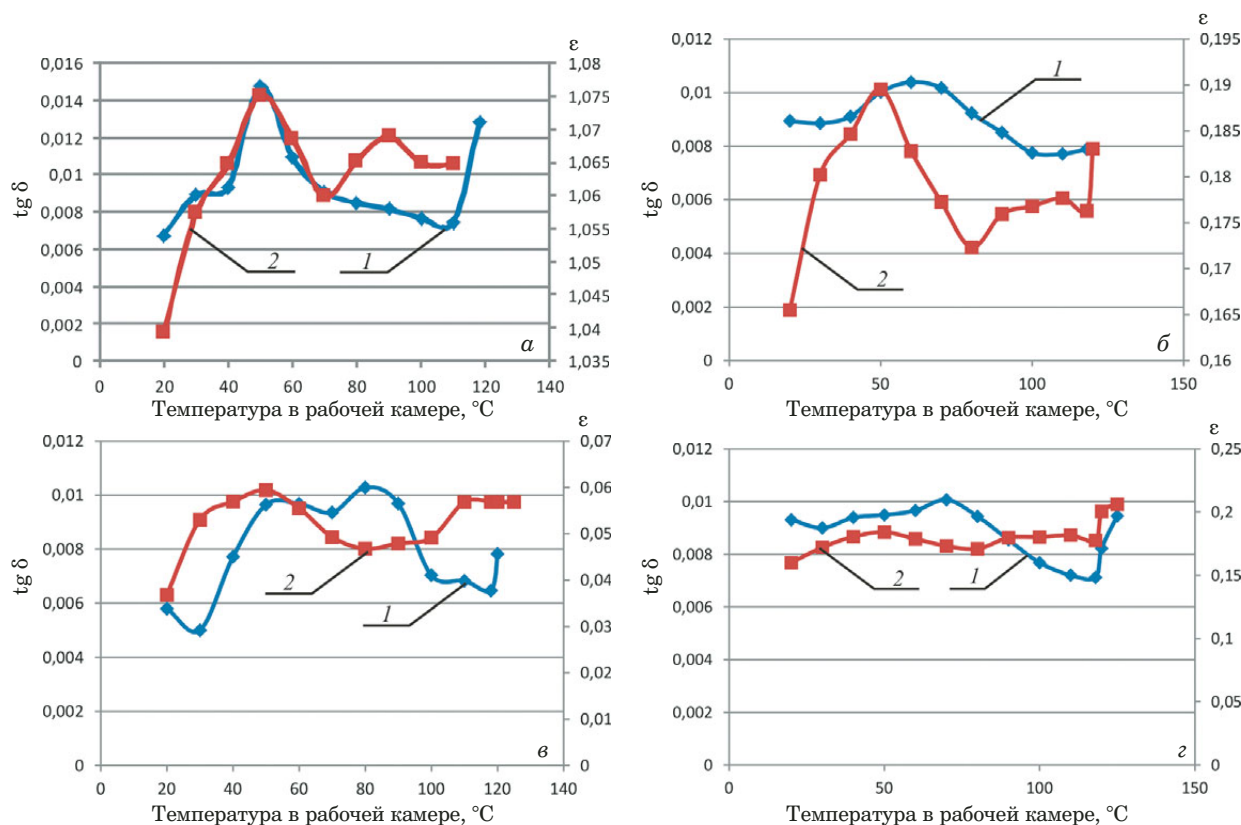


Рис. 5. Температурные зависимости ε (1) и $\tan \delta$ (2) полипропилена марки «Бимодал» (а, в) и полимерной стабилизирующей добавки марки «Баско» (б, г) с учетом влияния воздушной смеси в составе технологической системы и без учета этого влияния соответственно

Fig. 5. Temperature dependences ε (1) and $\tan \delta$ (2) of polypropylene “Bimodal” (a, c) and polymer stabilizing additive “Basco” (b, d) with and without taking into account the effect of the air mixture in the technological system, respectively

Обработка полимерных материалов сопровождается их нагревом, поэтому диэлектрические свойства воздушной составляющей технологической системы анализировали также в зависимости от температуры.

Натурные испытания по определению диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь полимеров с учетом влияния воздушной составляющей, входящей в состав технологической смеси, проводили в соответствии с ГОСТ 22372–2015. Использовали по 15 образцов каждого материала. Это позволило провести три серии экспериментов.

Анализ изменения диэлектрических свойств воздушной составляющей показал, что нагрев оказывает влияние на добротность контура и емкость рабочего конденсатора (рис. 4). Значения и динамику этих параметров следует учитывать при определении электрофизических показателей полимерных материалов.

Отметим, что под воздушной составляющей технологической системы понимается не только наличие воздуха в чистом виде, но и содержащаяся в нем газопылевая смесь, образующаяся при контакте полимеров друг с другом и частями технологической системы. Таким образом, моде-

лируется ситуация, наиболее схожая с производственными условиями.

На рис. 5 представлены температурные зависимости полученных электрофизических показателей полимеров с учетом меняющихся параметров воздушной смеси, находящейся в зазорах технологической системы.

Сравнение с используемыми на практике электрофизическими показателями, рассчитанными без учета влияния воздушной смеси в составе технической системы, показывает, что отклонения в значениях тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости для материалов «Бимодал» и «Баско» на частоте 27,12 МГц с нагревом технологического устройства до 120 °С достигают 12 и 9 % от их абсолютной величины.

Аппроксимация полученных данных дала возможность определить зависимости $\tan \delta$ и ε от температуры нагрева с учетом зазоров в составе смеси:

для «Бимодал»

$$\begin{aligned} \tan \delta = & 2 \cdot 10^{-12} T^6 - 9 \cdot 10^{-10} T^5 + 2 \cdot 10^{-7} T^4 - \\ & - 1 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,0006 T^2 - 0,0117 T + 0,0979, \end{aligned}$$

$$R^2 = 0,8097, \quad (5)$$

$$\varepsilon = -1 \cdot 10^{-10}T^5 + 4 \cdot 10^{-8}T^4 - 4 \cdot 10^{-6}T^3 + \\ + 0,0001T^2 - 0,0003T + 1,0115,$$

$$R^2 = 0,9009, \quad (6)$$

для «Баско»

$$\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-12}T^6 - 9 \cdot 10^{-10}T^5 + 2 \cdot 10^{-7}T^4 - \\ - 1 \cdot 10^{-5}T^3 + 0,0006T^2 - 0,0117T + 0,0979,$$

$$R^2 = 0,8095, \quad (7)$$

$$\varepsilon = -1 \cdot 10^{-10}T^5 + 4 \cdot 10^{-8}T^4 - 4 \cdot 10^{-6}T^3 + \\ + 0,0001T^2 - 0,0003T + 1,0115,$$

$$R^2 = 0,9007. \quad (8)$$

Относительное изменение тангенса угла диэлектрических потерь при нагреве исследуемых материалов значительно выше относительного изменения их диэлектрической проницаемости, следовательно, $\operatorname{tg} \delta$ оказывает основное влияние на диэлектрический нагрев и поэтому может быть выбран в качестве основного контролируемого параметра. Кроме того, для материалов «Бимодал» и «Баско» оптимальная температура нагрева составляет 50 °С (при ней $\operatorname{tg} \delta$ принимает максимальные значения).

Полученные результаты использовали для оптимизации технологического процесса ВЧ-обработки полимерных материалов. Апробацию проводили на предприятии химической отрасли при организации ВЧ-сушки. При испытаниях использовали промышленную электротермическую установку (модель УЗП 2500, частота — 27,12 МГц) для производства упаковочной пленки для продукции деревообработки.

Влияние воздушных зазоров на электрофизические показатели полимерного гранулята, как отмечалось ранее, считалось незначительным и при выборе режимов обработки не учитывалось. Поэтому такая технологическая подготовка ВЧ-обработки приводила к некачественной сушке, что отрицательно влияло на качество продукции. Объем рекламационного брака достигал 8 %. Оптимизация режимов работы ВЧ-обработки с применением научно-обоснованных данных позволила снизить объем брака с 8 до 2 % и одновременно повысить производительность выполнения операций на 7 %.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования по определению электрофизических параметров (тангенса угла диэлектрических потерь и относительной диэлектрической проницаемости) полипропилена марки «Бимодал» и полимерной ста-

билизирующей добавки марки «Баско» с учетом имеющихся в технологической системе зазоров показали, что воздушная среда играет значительную роль в общей диэлектрической проницаемости материалов. Значения $\operatorname{tg} \delta$ и ε могут отличаться от их декларируемых справочных значений на 12 и 9 % соответственно. Анализ динамики электрофизических показателей в зависимости от температуры выявил, что относительное изменение $\operatorname{tg} \delta$ при нагреве значительно выше относительного изменения ε . С использованием полученных данных определили оптимальную температуру ВЧ-нагрева (50 °С) исследуемых материалов, при которой $\operatorname{tg} \delta$ оказывает наибольшее влияние на мощность диэлектрического нагрева.

Полученные значения температуры обработки, тангенса угла диэлектрических потерь и относительной диэлектрической проницаемости материалов с учетом воздушных зазоров в смеси использовали для оптимизации технологического процесса ВЧ-сушки при производстве упаковочной пленки. Это повысило качество продукции (снижение брака — с 8 до 2 %) и производительность труда на 7 %.

Финансирование

Работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Дополнительные гранты на проведение или руководство данным исследованием не привлекались.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тугов И. И., Костыркина Г. И. Химия и физика полимеров. — М.: Химия, 1989. — 430 с.
2. Тагер А. А. Физикохимия полимеров. — М.: Научный мир, 2007. — 573 с.
3. Буторин Д. В., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В. и др. Разработка методики определения структурных превращений в полимерных материалах / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1(53). С. 96 – 103.
4. Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г., Попов С. И. и др. Исследование влияния диэлектрических элементов рабочего конденсатора высокочастотной электротермической установки на процесс обработки полимерных материалов / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3(39). С. 270 – 275.
5. Лившиц А. В., Ларченко А. Г., Филатова С. Н. Высокочастотная электротермическая обработка неметаллического вторичного сырья / Наука и образование. 2014. № 6. С. 55 – 65.
6. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки до 2030 г. / Авиационные материалы и технологии. 2020. № 5. С. 7 – 17.
7. Ларченко А. Г., Попов С. И., Филиппенко Н. Г. Определение физико-механических параметров полимерных материалов при высокочастотном диэлектрическом нагреве в электротермических установках / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 2(38). С. 152 – 157.

8. **Дубинский В. Г., Кудрявцев Д. А.** Совершенствование технологий и оборудования для осушки МГ после испытаний / Нефть и газ. 2009. № 2/н. С. 20 – 23.
9. **Лившиц А. В., Машович А. Я.** Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 адаптивным методом. Использование автоматизированной установки в лабораторных целях / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2(30). С. 193 – 198.
10. **Лившиц А. В.** Автоматизированные исследования процесса пропитки эластомеров / Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 1(46). С. 72 – 78. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78
11. **Bakanin D., Bychkovsky V., Butorin D.** Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731 – 740. DOI: 10.51955/23121327_2022_2_19
12. **Сафин Р. Р., Хасаншин Р. Р., Сафин Р. Г.** Исследование конвективной сушки пиломатериалов при стационарном пониженном давлении / IV Международ. симпозиум «Строение, свойства и качество древесины»: сб. тр. — СПб.: ПГЛТА, 2004. С. 523 – 526.
13. **Сафин Р. Р.** Исследование процессов вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла / Вестник ТГТУ. 2006. Т. 12. № 4А. С. 978 – 993.
14. **Coat J.** Polymer heterogeneity in waterborne coatings / Technol. Res. 2020. N 7(1). P. 1 – 21. DOI: 10.1007/s11998-009-9201-5
15. **Думчев И. С., Ларченко А. Г., Попов С. И. и др.** Восстановление полиамидных сепараторов подшипников буксового узла подвижного состава ОАО РЖД / Молодой ученый. 2017. № 12. С. 48 – 51. DOI: 10.15826/analitika.2012.19.2.009
16. **Ефимов В. А., Шведкова А. К., Коренькова Т. Г. и др.** Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натурных условиях / Труды ВИАМ. 2021. № 1. Ст. 05. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-16-26
17. **Филиппенко Н. Г.** Исследование механических характеристик полиамидных материалов сепараторов буксовых узлов подвижного состава / Завод. лаб. Диагност. мат. 2017. Т. 83. № 12. С. 43 – 47.
18. **Tomba J., Xiaodong Y., Fugang L.** Polymer Blend Latex Films: Miscibility and PolymerDiffusion Studied by Energy / Transfer. Polymer. 2018. N 49(8). P. 2055 – 2064.
19. **Костишин В. Г., Шакирзянов Р. И., Исаев И. М. и др.** Анализ электромагнитных свойств композитов 2000НН/2000НМ с сегнетоэлектрическими и полимерными матрицами / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 12. С. 44 – 52. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-12-44-52
- processing polymer materials / Sovr. Tekhnol. Sist. Analiz. Model. 2013. N 3(39). P. 270 – 275 [in Russian].
5. **Livshits A. V., Larchenko A. G., Filatova S. N.** High-frequency electrothermal treatment of non-metallic secondary raw materials / Nauka Obraz. 2014. N 6. P. 55 – 65 [in Russian].
6. **Kablov E. N.** Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing until 2030 / Aviats. Mater. Tekhnol. 2020. N 5. P. 7 – 17 [in Russian].
7. **Larchenko A. G., Popov S. I., Filippenko N. G.** Determination of physical and mechanical parameters of polymer materials during high-frequency dielectric heating in electrothermal installations / Sovr. Tekhnol. Sist. Analiz. Model. 2013. N 2(38). P. 152 – 157 [in Russian].
8. **Dubinsky V. G., Kudryavtsev D. A.** Improvement of technologies and equipment for gas pipeline drying after testing / Neft i gas. 2009. N 2/n. P. 20 – 23 [in Russian].
9. **Livshits A. V., Mashovich A. Ya.** Automation of the process of high-frequency heating of materials on an industrial installation UZP 2500 using the adaptive method. Using an automated installation for laboratory purposes / Sovr. Tekhnol. Sist. Analiz. Model. 2011. N 2(30). P. 193 – 198 [in Russian].
10. **Livshits A. V.** Automated studies of the process of impregnation of elastomers / Élektrotekhnol. Élektroobor. APK. 2022. Vol. 69. N 1(46). P. 72 – 78 [in Russian]. DOI: 10.22314/2658-4859-2022-69-1-72-78
11. **Bakanin D., Bychkovsky V., Butorin D.** Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731 – 740. DOI: 10.51955/23121327_2022_2_19
12. **Safin R. R., Khasanshin R. R., Safin R. G.** Study of convective drying of lumber under stationary reduced pressure / Proceedings of the IV International Symposium “Structure, properties and quality of wood”. — St. Petersburg: PGLTA, 2004. P. 523 – 526 [in Russian].
13. **Safin R. R.** Study of the processes of vacuum drying of lumber with convective methods of heat supply / Vestn. TGTU. 2006. Vol. 12. N 4А. P. 978 – 993 [in Russian].
14. **Coat J.** Polymer heterogeneity in waterborne coatings / Technol. Res. 2020. N 7(1). P. 1 – 21. DOI: 10.1007/s11998-009-9201-5
15. **Dumchev I. S., Larchenko A. G., Popov S. I., et al.** Restoration of polyamide separators of bearings of the axle box unit of the rolling stock of Russian Railways / Molodoy ucheny. 2012. N 12. P. 48 – 51 [in Russian]. DOI: 10.15826/analitika.2012.19.2.009
16. **Efimov V. A., Shvedkova A. K., Korenkova T. G., et al.** Study of polymeric structural materials under the influence of climatic factors and loads in laboratory and natural conditions / Proceedings of VIAM. 2021. N 1. Art. 05 [in Russian]. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-16-26
17. **Filippenko N. G.** Investigation of the mechanical characteristics of polyamide materials of separators for axle boxes of rolling stock / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2017. Vol. 83. N 12. P. 43 – 47 [in Russian].
18. **Tomba J., Xiaodong Y., Fugang L.** Polymer Blend Latex Films: Miscibility and PolymerDiffusion Studied by Energy / Transfer. Polymer. 2018. N 49(8). P. 2055 – 2064.
19. **Kostishin V. G., Shakirzyanov R. I., Isaev I. M., et al.** Analysis of the electromagnetic properties of 2000НН/2000НМ composites with ferroelectric and polymer matrices / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2023. Vol. 89. N 12. P. 44 – 52 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-12-44-52

REFERENCES

1. **Tugov I. I., Kosturkina G. I.** Chemistry and physics of polymers. — Moscow: Khimiya, 1989. — 430 p. [in Russian].
2. **Tager A. A.** Physicochemistry of polymers. — Moscow: Nauchny mir, 2007. — 573 p. [in Russian].
3. **Butorin D. V., Filippenko N. G., Livshits A. V., et al.** Development of a technique for determining structural transformations in polymer materials / Sovr. Tekhnol. Sist. Analiz. Model. 2015. N 4(48). P. 80 – 86 [in Russian].
4. **Livshits A. V., Filippenko N. G., Popov S. I., et al.** Study of the influence of dielectric elements of the working capacitor of a high-frequency electrothermal installation on the process of