

ВЛИЯНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ Fe_3O_4 , ZnO НА ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНУЮ СТОЙКОСТЬ ИНГИБИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

© Е. В. Воробьева

Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,
246019, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Советская, д. 104
E-mail: evorobyova@gsu.by

Поступила в Редакцию 3 июня 2021 г.
После доработки 12 августа 2021 г.
Принята к публикации 31 августа 2021 г.

Изучено влияние наполнителей — наночастиц оксидов металлов (Fe_3O_4 , ZnO) — на термоокислительную стойкость полиэтилена, ингибированного фенольным антиоксидантом ирганокс 1010. Распределение наночастиц в полимерной матрице проводили с помощью ультразвука, формирование образцов осуществляли методом термического прессования. Термоокислительную стойкость определяли по продолжительности индукционного периода окисления пленочных образцов. Показано, что давление пресса при формировании материала оказывает существенное влияние на термоокислительную стойкость ингибированного композита, как наполненного наночастицами Fe_3O_4 , ZnO , так и ненаполненного. Характер влияния концентрации нанонаполнителя на термоокислительную стойкость образцов зависит от применяемого оксида металла. Увеличение концентрации наполнителя Fe_3O_4 приводит к сокращению термоокислительной стойкости полимера, при использовании ZnO указанная зависимость имеет обратный характер. При окислении полученных нанокompозитных пленочных образцов, сформированных в условиях высокого давления, выявлены синергические эффекты нанонаполнителей и антиоксидантов.

Ключевые слова: полиэтилен; термоокисление; нанонаполнитель; оксид железа; оксида цинка; фенольный антиоксидант; синергический эффект

DOI: 10.31857/S0044461821080077

Применение наночастиц в качестве наполнителей для полимерных матриц позволяет получить новые по своим эксплуатационным характеристикам композиционные материалы. Нанокompозиты с полиолефиновыми матрицами склонны к термоокислению и малоустойчивы к деформациям при термическом воздействии, поэтому необходим контроль термических и термоокислительных свойств таких композитов. Термическое окисление полимерной матрицы, которое неизбежно при эксплуатации материала, постепенно меняет структуру полимера, приводит к снижению значений механических и диэлектрических показателей материала [1–3]. Изменение свойств объясняется повышенной полярностью полимера, движением его полярных сегментов, что в свою очередь является следствием увеличения количества

полярных карбонильных групп в составе макромолекул, а также доли аморфной фазы в полимере.

Ряд нанонаполнителей демонстрирует инертность по отношению к процессу окисления полиолефиновой матрицы. Однако отмечено [4, 5], что композитные полиэтиленовые пленки (ПЭНП), наполненные инертными к процессам окисления графитовыми нанопластинами или наночастицами MgO , отличались повышенной устойчивостью к термоокислению и характеризовались более низкой температурой начала терморазложения по сравнению с пленками чистого полимера. К. Chrissafis [6] высказал гипотезу, что возрастание термоокислительной устойчивости при введении инертных нанонаполнителей происходит за счет дополнительного повреждения макромолекулярных цепей полиэтилена, которые снижают

термическое напряжение во время термоокисления. В то же время, по данным [1, 7], наночастицы глины, карбоната кальция, которые также являются каталитически инертными к процессу окисления, напротив, ускоряли термическое окисление полимерной матрицы, что особенно выражено в случае использования антиоксидантов. Снижение термоокислительной стойкости наполненных содержащих антиоксиданты полимерных матриц в большинстве случаев исследователи связывают с адсорбцией антиоксиданта на наполнителе [8, 9]. Влияние наполнителей на термоокислительную стойкость ингибированных полиолефинов рассмотрено в обзоре [10].

Стабилизация полиэтиленовых матриц становится еще более сложной задачей, если применяемые нанонаполнители являются каталитически активными по отношению к процессам окисления, к таким наполнителям относятся в основном переходные металлы или металлы переменной валентности (Co, Mn, Cr, Cu, Ni, Fe, Zn и др.) и их соединения [11]. Каталитическое влияние металлов реализуется через циклическое участие ионов металла в реакциях разложения гидроперекисных соединений, образующихся в цепных реакциях окисления полиолефинов [12]. Наночастицы Fe_3O_4 , ZnO являются каталитически активными соединениями по отношению к процессу окисления, тем не менее они часто используются в качестве нанонаполнителей. Наночастицы Fe_3O_4 привлекают исследователей своей термической стабильностью, электрохимическими, магнитными свойствами, а также низкой токсичностью [13–15]. Наночастицы ZnO в составе полимерных матриц повышают прочность, твердость, диэлектрическую проницаемость получаемых нанокомпозитов, а также придают получаемым материалам антибактериальные свойства [16–18]. Ввиду актуальности проблемы стабилизации композиционных материалов с полиолефиновыми матрицами, а также в связи с достаточно широким использованием наночастиц Fe_3O_4 , ZnO в качестве наполнителей была поставлена данная работа.

Цель работы — исследование влияния наноразмерных наполнителей Fe_3O_4 , ZnO на термоокислительную стойкость полиэтилена, ингибированного фенольным антиоксидантом ирганокс 1010.

Экспериментальная часть

В исследованиях использовался порошкообразный нестабилизированный полиэтилен низкого давления (марка 277-73, ООО «Ставролен»), в который вводили антиоксидант фенольного типа — ирганокс 1010 [пентаэритриттетраокси(3-(3,5-ди-*трет*-

бутил-4-гидроксифенил)пропионат)] (Ciba Specialty Chemicals), нанонаполнители: Fe_3O_4 в кристаллической форме магнетита (размер частиц 20–30 нм, US Research Nanomaterials) и ZnO (размер частиц 30 ± 10 нм, Aladdin Chemistry Co. Ltd).

Порошки полиэтилена, антиоксиданта, оксида металла смешивали и добавляли ацетон (ч.д.а., ООО «Экохимтех»), дальнейшее перемешивание суспензии осуществляли на магнитной мешалке (3 мин). Суспензии подвергали воздействию ультразвука частотой 20 кГц в течение 3 мин (установка УЗДН-2Т, НПП «УкрРосПрибор»). После испарения ацетона (спустя 1 сут) композицию еще раз механически перемешивали и поворачивали термическое прессование. Порошковые смеси прессовали между плитками пресса, нагретого до 150°C , в двух режимах прессования: режим низкого давления — $0.35 \text{ кгс}\cdot\text{см}^{-2}$, или 0.034 МПа (пресс лабораторный ПППР 4, СКТБ «УЧ Прибор»); режим высокого давления — $40 \text{ кгс}\cdot\text{см}^{-2}$, или 3.9 МПа (пресс Carver, модель 3851-9). Продолжительность прессования образцов составляла около 30–90 с (минимальное время, необходимое для получения пленки). Толщину формируемых пленок 100 мкм контролировали микрометром (микрометр рычажный с наружным индикатором МРИ-100 75-100 0.01, Челябинский инструментальный завод). Пленки наплавливали на кристаллы KBr — материал прозрачный в ИК-области спектра. Окисление образцов полимерных композитов осуществляли в термошкафах при температуре 150°C .

Термоокислительную стойкость экспериментальных образцов определяли по продолжительности индукционного периода окисления. За окончание индукционного периода окисления образца принимали момент термоокисления, в который коэффициент экстинкции полосы поглощения 1720 см^{-1} (или карбонильный индекс) в ИК-спектрах образцов достигал значений 3–4 ед. Значение показателя экстинкции 1720 см^{-1} рассчитывали как отношение площади пика поглощения в области 1720 см^{-1} (диапазон $1840\text{--}1670 \text{ см}^{-1}$) к площади базовой полосы в области 1465 см^{-1} (диапазон $1505\text{--}1390 \text{ см}^{-1}$) и к толщине пленок (100 мкм). ИК-спектры регистрировали на ИК-Фурье-спектрофотометре Vertex-70 (Bruker), расчет площади пиков поглощения проводили с использованием пакета OPUS 7.5.

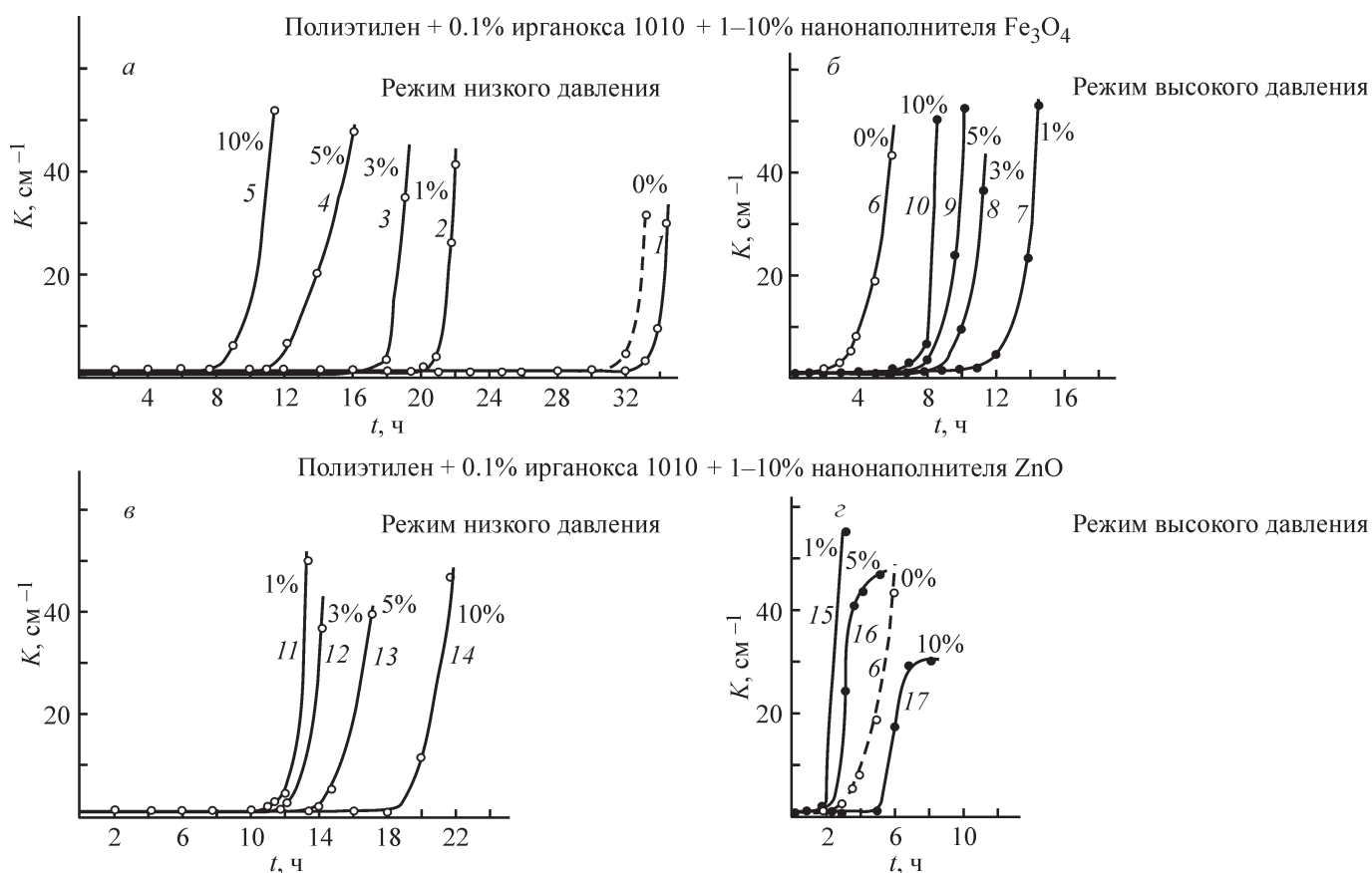
Обсуждение результатов

Равномерное распределение наночастиц в полимерной матрице обеспечивает ультразвуковое воздействие, но антиоксидант имеет молекулярное

строение и хорошо распределяется в полимере даже при растворном способе введения. По этой причине дополнительное ультразвуковое воздействие на подготовленную суспензию порошков полимера и антиоксиданта, не содержащую наночастицы оксида металла, практически не изменило термоокислительную стойкость изготавливаемых полимерных образцов: индукционный период окисления образцов пленок без ультразвукового воздействия составлял 31 ч, а при ультразвуковом воздействии — 32 ч (см. рисунок, а).

Доминирующим фактором, оказывающим влияние на термоокислительную стойкость полученных нанокомпозитов, является давление, приложенное к образцам на стадии прессования. Различия в продолжительности индукционного периода окисления образцов, содержащих 0.1 мас% антиоксиданта ирганокс 1010, сформированных в режиме низкого

давления (см. рисунок, а, кривая 1), и аналогичных образцов, сформированных в режиме высокого давления (см. рисунок, б, кривая 6), составляет около 30 ч. Причины снижения эффективности фенольного антиоксиданта при увеличении давления термпрессования подробно рассмотрены в [19]. В работе было показано, что при увеличении давления одновременно протекают два процесса: диффузионное насыщение полимера молекулами антиоксиданта (процесс, потенциально приводящий к увеличению термоокислительной стойкости полимера) и разрушение фенольных групп антиоксиданта (процесс, приводящий к снижению термоокислительной стойкости полимера). Процесс разрушения антиоксиданта является более выраженным, поэтому ингибированные пленки, сформированные в условиях повышенного давления, характеризуются низкой термостойкостью (см. рисунок, б, кривая 6).



Зависимость показателя экстинкции полосы поглощения 1720 см^{-1} в ИК-спектрах полиэтиленовых пленок, содержащих 0.1 мас% ирганокс 1010 и нанонаполнитель Fe_3O_4 (а, б) или ZnO (в, з) (концентрация отмечена на кривых), от продолжительности термоокисления пленок при 150°C на подложках из КВг.

Формирование образцов проводили при использовании ультразвука, термпрессование проводили в режиме низкого (а, в) или высокого (б, з) давления.

Штрихами отмечена кривая, зарегистрированная для полиэтиленовой пленки, содержащей 0.1 мас% ирганокс 1010, сформированной в режиме низкого давления, без использования ультразвука.

Ингибированные полиэтиленовые пленки, сформированные при низком давлении, при введении нанонаполнителя Fe₃O₄ стали менее устойчивыми к окислению: процесс образования карбонильных групп в наполненных пленках начался значительно раньше, индукционный период окисления экспериментальных пленок сократился (см. рисунок, а, кривые 2–5). Введение нанонаполнителя Fe₃O₄ привело к увеличению индукционного периода окисления пленок, сформированных в условиях высокого давления (см. рисунок, б, кривые 7–10), относительно индукционного периода окисления образца без наполнителя (см. рисунок, б, кривая 6).

Снижение термоокислительной стойкости наполненных Fe₃O₄ ингибированных пленок является ожидаемым ввиду известного факта каталитического влияния Fe₃O₄ на процесс окисления полиолефинов [11, 20]. Длительность индукционного периода окисления полимерных образцов, сформированных при низком давлении, представляет собой аддитивный результат действия в полимерной матрице двух модификаторов: антиоксиданта, ингибирующего процесс окисления полимера (увеличение индукционного периода), и нанонаполнителя Fe₃O₄, катализирующего этот процесс (уменьшение индукционного периода). При условии постоянной концентрации антиоксиданта влияние концентрации нанонаполнителя Fe₃O₄ на продолжительность индукционного периода окисления образцов является антибатным: чем выше содержание нанонаполнителя Fe₃O₄ в образце, тем меньше его индукционный период окисления (см. таблицу).

Увеличение термоокислительной стойкости в присутствии нанодисперсного оксида железа Fe₃O₄ в ингибированных полимерных пленочных образцах, сформированных при высоком давлении, мож-

но рассматривать как синергизм антиоксиданта и наполнителя. Наибольший по продолжительности индукционный период окисления характерен для образцов пленок, содержащих минимальное количество нанонаполнителя, например, индукционный период окисления пленки, содержащей 1 мас%, около 12 ч (см. рисунок, б, кривая 7). Увеличение концентрации Fe₃O₄ в пленке снижает термоокислительную стойкость и продолжительность индукционного периода окисления образцов (см. рисунок, б, кривые 7–10), т. е. общая закономерность антибатного влияния концентрационного фактора наполнителя на продолжительность индукционного периода образцов сохраняется (см. таблицу) как для образцов, сформированных в режиме низкого давления, так и для образцов, сформированных в режиме высокого давления. Отмеченные закономерности показывают, что изменение давления прессования не изменяет каталитическое влияние Fe₃O₄ на процесс окисления полиэтилена. Можно предположить, что активный в отношении окисления нанонаполнитель Fe₃O₄ защищает антиоксидант от разрушения, вызванного высоким давлением, в итоге пленки, содержащие антиоксидант и нанонаполнитель, характеризуются большими значениями индукционного периода окисления (см. рисунок, б, кривые 7–10), чем пленки, содержащие только антиоксидант (см. рисунок, б, кривая 6). Детально механизм защиты антиоксиданта нанонаполнителем следует изучать дополнительно, но можно сделать вывод, что выявленный синергический эффект является следствием не химического, а физического процесса.

При термоокислительных испытаниях образцов полиэтиленовых пленок, содержащих антиоксидант ирганокс 1010 (0.1 мас%) и нанонаполнитель

Влияние концентрации нанонаполнителей (Fe₃O₄, ZnO) в составе ингибированных полиэтиленовых пленок на продолжительность их индукционного периода окисления при термовоздействии
Толщина пленок 100 мкм, температура термоокисления 150°C

Режим прессования	Наполнитель	
	Fe ₃ O ₄	ZnO
Низкое давление	Концентрация наполнителя ↔	Концентрация наполнителя ↔
	Продолжительность индукционного периода окисления	Продолжительность индукционного периода окисления
Высокое давление	Концентрация наполнителя ↔	Концентрация наполнителя ↔
	Продолжительность индукционного периода окисления	Продолжительность индукционного периода окисления

ZnO (1–10 мас%), выявлена другая закономерность влияния концентрации нанонаполнителя на продолжительность индукционного периода окисления: с ростом концентрации нанонаполнителя ZnO индукционный период окисления образцов увеличивается (см. рисунок, в, кривые 11–14), при этом зависимость длительности индукционного периода окисления от концентрации наполнителя является прямой (см. таблицу). Эта закономерность сохраняется при испытаниях образцов, сформированных при высоком давлении (см. рисунок, г, кривые 15–17; таблицу). Полученный экспериментальный результат закономерен при учете явления синергизма между фенольным антиоксидантом ирганокс 1010 и ZnO. Это явление описано в [21, 22] для композитов, содержащих ирганокс 1010 и микроразмерный наполнитель ZnO. В работе [22] сделано предположение относительно механизма этого явления, заключающееся в регенерации фенольного антиоксиданта на поверхности наполнителя. Сокращение индукционного периода окисления пленок, содержащих нанонаполнитель ZnO и антиоксидант (см. рисунок, г, кривые 11–14), по сравнению с пленками, содержащими только антиоксидант (см. рисунок, а, кривая 1), указывает на каталитическую роль ZnO в процессе окисления полимера, а прямая зависимость продолжительности индукционного периода окисления образцов от концентрации наполнителя отражает протекающий параллельно процесс взаимодействия наполнителя и антиоксиданта, приводящий к синергическому росту термоокислительной стойкости образцов.

В пленках, сформированных в режиме низкого давления (см. рисунок, в), каталитические процессы окисления преобладают над процессами, приводящими к увеличению термоокислительной стойкости, поэтому термоокислительная стойкость наполненных образцов оказывается ниже, чем ненаполненных. Однако при формировании пленок в режиме высокого давления пресса термоокислительная стойкость ненаполненных ингибированных образцов оказывается настолько низкой (см. рисунок, б, кривая б; г, штриховая кривая), что продолжительность индукционного периода окисления наполненного образца превышает индукционный период окисления ненаполненного (см. рисунок, г, кривая 17).

На основании результатов исследований можно дать некоторые технологические рекомендации. Так, при термопрессовании композитов, содержащих каталитически активные нанонаполнители Fe_3O_4 или ZnO, следует проводить жесткий контроль давления. В случае высокого давления термопрессования нано-

наполненных полимерных продуктов или материалов, содержащих фенольный антиоксидант, рекомендовано использование нанонаполнителя Fe_3O_4 в невысоких концентрациях от 1 до 3 мас% для увеличения термоокислительной стойкости и ресурса эксплуатации конечного продукта. При получении композита, содержащего нанонаполнитель ZnO и фенольный антиоксидант, необходимо обеспечить высокое содержание (10 мас% и выше) нанонаполнителя в полимерной матрице.

Выводы

При формировании полимерных композитов в режиме низкого давления введение нанонаполнителя Fe_3O_4 в ингибированный полиэтилен существенно сокращает термоокислительную стойкость получаемых композитов. Нанонаполнитель Fe_3O_4 при формировании образцов в условиях высокого давления снижает негативное воздействие фактора давления на термоокислительную стойкость образцов, что можно рассматривать как синергизм нанонаполнителя Fe_3O_4 /антиоксидант ирганокс 1010. С увеличением концентрации нанонаполнителя Fe_3O_4 в ингибированном полиэтилене индукционный период окисления материала сокращается, что отмечено для обоих режимов формирования композитов.

Введение нанонаполнителя ZnO в ингибированный полиэтилен сокращает термоокислительную стойкость получаемых композитов по сравнению с образцами, содержащими только антиоксидант ирганокс 1010. Однако увеличение концентрации нанонаполнителя ZnO снижает его негативное влияние на термоокислительную стойкость, что обусловлено синергизмом фенольного антиоксиданта ирганокс 1010 и ZnO. При формировании пленочных полимерных образцов в условиях высокого давления снижается термоокислительная стойкость материала, поэтому пленки, содержащие дополнительно 10 мас% нанонаполнителя ZnO, оказываются более стойкими к воздействию окисления, чем пленки, содержащие только антиоксидант.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Материаловедение, новые материалы и технологии» (2021–2025 годы) (подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы», задание № 4.1.4).

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Воробьева Елена Валерьевна, к.х.н., доцент,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5580-6990>

Список литературы

- [1] Taşdemir M., Çöl F. Effects of particle size on mechanical, thermal and morphological properties of untreated nano and micro calcium carbonate powder [CaCO_3] filled HDPE polymer composites // J. Polym. Mater. 2012. V. 29. N 2. P. 229–241.
- [2] Zeinalov E. B., Guseinova Z. N., Ishchenko N. Y., Agaev B. K., Kabetkina Y. P. The effect of nano titanium dioxide on the physicomechanical properties and heat ageing of low-density polyethylene // Int. Polym. Sci. Technol. 2013. V. 40. N 1. P. 57–59.
<https://doi.org/10.1177%2F0307174X1304000113>
- [3] Fothergill J. C., Dodd S. J., Dissado L. A., Liu T., Nilsson U. H. The measurement of very low conductivity and dielectric loss in XLPE cables: A possible method to detect degradation due to thermal aging // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2011. V. 18. N 5. P. 1544–1553.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.6032823>
- [4] Chaudhry A. U., Lonkar S. P., Chudhary R. G., Mabrouk A., Abdala A. A. Thermal, electrical, and mechanical properties of highly filled HDPE/graphite nanoplatelets composites // Mater. Today: Proc. 2020. V. 29. P. 704–708.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.168>
- [5] Wang Y., Wang C., Zhang Z., Xiao K. Anti-thermal aging properties of low-density polyethylene-based nanocomposites // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2018. V. 25. N 3. C. 1003–1013.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006783>
- [6] Chrissafis K., Paraskevopoulos K. M., Pavlidou E., Bikiaris D. Thermal degradation mechanism of HDPE nanocomposites containing fumed silica nanoparticles // Thermochim. Acta. 2009. V. 485. N 1–2. P. 65–71.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.12.011>
- [7] Ahmad I., Li C. Y., Hsuan Y. G., Cairncross R. A. Reaction model describing antioxidant depletion in polyethylene–clay nanocomposites under thermal aging // Polym. Degrad. Stab. 2014. V. 110. C. 318–335.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.09.002>
- [8] D'silva A. P. Adsorption of antioxidants by carbon blacks // Carbon. 1998. V. 36. N 9. P. 1317–1325.
[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00112-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00112-2)
- [9] Wong W. K., Cheng S., Li C. Y., Ahmad I., Cairncross R., Hsuan Y. G. Depletion mechanism of antioxidants in MDPE-clay nanocomposites under thermal aging // Polym. Degrad. Stab. 2012. V. 97. N 2. C. 192–199.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.10.010>
- [10] Ленартович Л. А., Прокопчук Н. Р., Шкодич В. Ф. Тепловое старение наполненных стабилизированных композиций (обзор) // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18. № 9. С. 41–48.
- [11] Gorghiu L. M., Jipa S., Zaharescu T., Setnescu R., Mihalcea I. The effect of metals on thermal degradation of polyethylenes // Polym. Degrad. Stab. 2004. V. 84. N 1. P. 7–11.
[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00265-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00265-9)
- [12] Скибида И. П. Кинетика и механизм распада органических гидроперекисей в присутствии соединений переходных металлов // Успехи химии. 1975. Т. 44. № 10. С. 1729–1747 [Skibida I. P. Kinetics and mechanism of the decomposition of organic hydroperoxides in the presence of transition metal compounds // Russ. Chem. Rev. 1975. V. 44. N 10. P. 789–800. <https://doi.org/10.1070/RC1975v044n10ABEH002376>].
- [13] Orsini N. J., Babić-Stojić B., Spasojević V., Calatayud M. P., Cvjetičanin N., Goya G. F. Magnetic and power absorption measurements on iron oxide nanoparticles synthesized by thermal decomposition of $\text{Fe}(\text{acac})_3$ // J. Magn. Magn. Mater. 2018. V. 449. P. 286–296.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.10.053>
- [14] Ramazanov M. A., Shirinova H. A., Hajiyeve F. V. The impact of manufacturing technology, of the polypropylene matrix and iron oxide nanoparticles based magnetodielectric nanocomposites on electrophysical parameters // Mater. Chem. Phys. 2020. V. 253. P. 123287–123423.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123287>
- [15] Azam M., Akhtar K., Riaz S., Naseem S. Structural and magnetic properties of lower temperature calcined iron oxide nanoparticles // Mater. Today: Proc. 2015. V. 2. N 10. P. 5700–5704.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.11.113>
- [16] Tjong S. C., Liang G. D. Electrical properties of low-density polyethylene/ ZnO nanocomposites // Mater. Chem. Phys. 2006. V. 100. N 1. P. 1–5.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.11.029>
- [17] Mahmoud M. E., Khalifa M. A., El-Sharkawy R. M., Youssef M. R. Effects of Al_2O_3 and BaO nano-additives on mechanical characteristics of high-density polyethylene // Mater. Chem. Phys. 2021. V. 262. P. 124251–124255.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124251>
- [18] Мазитова Г. Т., Куенская К. И., Буторова И. А. Зависимость антимикробной активности нанодис-

- персий оксида цинка от формы и размера частиц // ЖПХ. 2020. Т. 93. № 6. С. 823–827.
<https://doi.org/10.31857/S0044461820060079>
[Mazitova G. T., Kienskaya K. I., Butorova I. A. Dependence of antimicrobial activity of zinc oxide nanodispersions on the shape and size of the particles // Russ. J. Appl. Chem. 2020. V. 93. N 6. P. 821–825. <https://doi.org/10.1134/S1070427220060075>].
- [19] Лин Д. Г., Воробьева Е. В. Снижение эффективности фенольного антиоксиданта при получении пленок ингибированного полиэтилена методом термического прессования // ЖПХ. 2017. Т. 90. № 5. С. 648–656 [Lin D. G., Vorob'eva E. V. Decrease in the performance of a phenolic antioxidant in preparation of inhibited polyethylene films by hot pressing // Russ. J. Appl. Chem. 2017. V. 90. N 5. P. 780–787. <https://doi.org/10.1134/S1070427217050196>].
- [20] Егоренков Н. И., Кузавков А. И., Докторова В. А. Контактное окисление и адгезия к стали полиэтиленовых покрытий // Высокомолекуляр. соединения. 1982. Т. 24А. № 12. С. 2475–2481 [Yegorenkov N. I., Kuzavkov A. I., Doktorova V. A. Contact oxidation and adhesion to steel of polyethylene coatings // Polym. Sci. USSR. 1982. V. 24. N 12. P. 2840–2848. [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(82\)90234-9](https://doi.org/10.1016/0032-3950(82)90234-9)].
- [21] Лин Д. Г., Воробьева Е. В. Влияние размера частиц наполнителя оксида цинка на термоокислительную стойкость полиэтилена, ингибированного ирригатором 1010 // Полимер. материалы и технологии. 2016. № 1. Т. 2. С. 61–67.
<https://mpri.org.by/assets/files/pmt2/1/lin.pdf>
- [22] Лин Д. Г., Воробьева Е. В., Марченко Н. В. Окисление ингибированного фенольным антиоксидантом полиэтилена в условиях контакта с металлическим цинком // ЖПХ. 2008. Т. 81. № 11. С. 1866–1871 [Lin D. G., Vorob'eva E. V., Marchenko N. V. Oxidation of polyethylene inhibited with a phenolic antioxidant under the conditions of contact with metallic zinc // Russ. J. Appl. Chem. 2008. V. 81. N 11. P. 1981–1986. <https://doi.org/10.1134/S1070427208110220>].
-