

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-3-54-63>

УДК 621.798:678.07

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЛЛОВОЙ КИСЛОТЫ В КАЧЕСТВЕ АНТИОКСИДАНТА ДЛЯ ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ

Е. В. ВОРОБЬЕВА⁺

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, ул. Советская, 104, 246028, г. Гомель, Беларусь

В работе изучена возможность применения галловой кислоты как природного антиоксиданта для стабилизации полиэтиленовых пленок, в том числе пленок, содержащих дисперсную медь.

Цель работы — оценить эффективность применения галловой кислоты как антиоксиданта полиэтилена и его медьсодержащих композитов; в ИК-спектрах окисляющегося полиэтилена выявить основные репрезентативные полосы, относящиеся к молекулам галловой кислоты.

В экспериментах степень окисления пленочных образцов определяли по полосе 1720 см^{-1} (карбонильный индекс, ИК-спектроскопия), а эффективность вводимых добавок — по продолжительности индукционного периода окисления (ИПО). В ИК-спектрах полиэтиленовых пленок, содержащих галловую кислоту, выявлен ряд полос поглощения, относящихся к валентным и деформационным колебаниям связей функциональных групп молекул галловой кислоты. Изменение интенсивности этих полос в ходе термоокисления позволило судить о распределении галловой кислоты в пленке и скорости ее расходования.

Установлено, что галловая кислота в составе полиэтиленовых пленок ингибирует процесс окисления полимера. ИПО полиэтиленовых пленок, содержащих 0,5 мас.% галловой кислоты, составляет 26 часов. При этом ИПО заканчивается только через 16 часов после расхода О–Н-связей молекул галловой кислоты, находящихся в сорбированном состоянии в объеме полимера (интенсивность полосы 3495 см^{-1}).

Дополнительное введение 1 мас.% дисперсной меди в ингибированный полимер приводит к сокращению ИПО пленок до 9 часов. В наполненных медью образцах снижение интенсивности полосы 3495 см^{-1} до нулевых значений практически совпадает с окончанием ИПО пленки.

Ключевые слова: полиэтилен, галловая кислота, индукционный период окисления, ИК-спектроскопия, антиокислительная активность, расход антиоксиданта, сорбция антиоксиданта, адсорбция антиоксиданта.

USES OF GALLIC ACID AS AN ANTIOXIDANT FOR POLYETHYLENE AND ITS COPPER-CONTAINING COMPOSITE

E. V. VOROBYOVA⁺

Francisk Skorina Gomel State University, Sovetskaya St., 104, 246028, Gomel, Belarus

The paper studies the possibility of using gallic acid as a natural antioxidant to stabilize polyethylene films, including films containing dispersed copper.

The aim of the work is to evaluate the efficiency of the using gallic acid as an antioxidant for polyethylene and its copper-containing composites; to identify the main representative bands related to gallic acid molecules in the IR spectra of oxidizing polyethylene.

⁺E-mail: evorobyova@gsu.by

In the experiments, the oxidation state of film samples was determined by the 1720 cm^{-1} band (carbonyl index, IR spectroscopy), and the efficiency of the introduced additives was determined by the duration of the induction period of oxidation (IPO). In the IR spectra of polyethylene films containing gallic acid, a number of absorption bands related to the valence and deformation vibrations of the bonds of the functional groups of gallic acid molecules were revealed. The change in the intensity of these bands during thermal oxidation made it possible to judge the participation of gallic acid in antioxidant reactions and the rate of its consumption.

It has been established that gallic acid in the composition of polyethylene films inhibits the process of polymer oxidation. IPO of polyethylene films containing 0.5 wt.% by weight of gallic acid is 26 hours. In this case, the end of the IPO of the films is recorded only 16 hours after the consumption of O–H bonds of gallic acid molecules, which are in the sorbed state in the polymer volume (band intensity 3495 cm^{-1}).

Additional introduction of dispersed 1 wt.% copper into the inhibited polymer leads to a reduction in the IPO of the films to 9 hours. In copper-filled samples, the decrease in the intensity of the 3495 cm^{-1} band to zero values practically coincides with the end of the IPO of the film.

Keywords: polyethylene, gallic acid, oxidation induction period, IR spectroscopy, antioxidant activity, antioxidant consumption, antioxidant sorption, antioxidant adsorption.

Поступила в редакцию 01.07.2024

© Е. В. Воробьева, 2024

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: polmattex@gmail.com
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Воробьева Е. В. Применение галловой кислоты в качестве антиоксиданта для полиэтилена и его медьсодержащих композитов // Полимерные материалы и технологии. 2024. Т. 10, № 3. С. 54–63. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-3-54-63>

Citation sample:

Vorob'eva E. V. Primenenie gallovoy kisloty v kachestve antioksidanta dlya polietilena i ego med'soderzhashchikh kompozitov [Uses of gallic acid as an antioxidant for polyethylene and its copper-containing composite]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2024, vol. 10, no. 3, pp. 54–63. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-3-54-63>

Литература

1. Jamshidian M., Tehrani E. A., Desobry S. Release of synthetic phenolic antioxidants from extruded poly lactic acid (PLA) film // *Food Control*, 2012, vol. 28, is. 2, pp. 445–455. doi: 10.1016/j.foodcont.2012.05.005
2. Xu X., Liu A., Hu S., Ares I., Martínez-Larrañaga M.-R., Wang Xu, Martínez M., Anadón A., Martínez M.-A. Synthetic phenolic antioxidants: Metabolism, hazards and mechanism of action // *Food Chemistry*, 2021, vol. 353. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129488
3. Tátraaljai D., Major L., Földes E., Pukánszky B. Study of the effect of natural antioxidants in polyethylene: Performance of β -carotene // *Polymer degradation and stability*, 2014, vol. 102, pp. 33–40. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2014.02.012
4. Kirschweng B., Tátraaljai D., Földes E., Pukánszky B. Efficiency of curcumin, a natural antioxidant, in the processing stabilization of PE: concentration effects // *Polymer Degradation and Stability*, 2015, vol. 118, pp. 17–23. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2015.04.006
5. Spece H., Yarbrough R. V., Kurtz S. M. In Vivo Performance of Vitamin E Stabilized Polyethylene Implants for Total Hip Arthroplasty: A Review // *The Journal of arthroplasty*, 2023, vol. 38, is. 5, pp. 970–979. doi: 10.1016/j.arth.2022.11.010
6. Воробьева Е. В. Особенности проявления антиокислительных свойств гидролизного лигнина в составе полиэтиленовых пленок, антагонизм лигнина и экстрактов лишайников // *Химия растительного сырья*. 2024. № 1. С. 83–94. doi: 10.14258/jcprm.20240112005
7. Masek A. Flavonoids as natural stabilizers and color indicators of ageing for polymeric materials // *Polymers*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 1125–

1144. doi: 10.3390/polym7061125
8. Gallic acid // Wikipedia [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Gallic_acid (дата обращения: 03.05.2024).
9. Ji H.-F., Zhang H.-Y., Shen L. Proton dissociation is important to understanding structure–activity relationships of gallic acid antioxidants // *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 2006, vol. 16, is. 15, pp. 4095–4098. doi: 10.1016/j.bmcl.2006.04.096
10. Денисов Е. Т. Окисление и деструкция карбоцепных полимеров. Ленинград : Химия, 1990. 286 с.
11. Лин Д. Г., Воробьева Е. В., Марченко Н. В. Влияние меди на окисление полиэтилена, содержащего антиоксиданты // *Журнал прикладной химии*. 2005. Т. 78, вып. 9. С. 1527–1532.
12. Денисов Е. Т., Денисова Т. Г. Реакционная способность природных фенолов // *Успехи химии*. 2009. Т. 78, № 11. С. 1129–1155.
13. Alberti A., Amorati R., Campredon M., Lucarini M., Macciantelli D., Pedulli G. Antioxidant activity of some simple phenols present in olive oil // *Acta Alimentaria*, 2009, vol. 38, no. 4, pp. 427–436. doi: 10.1556/AAlim.38.2009.4.3
14. Badhani B., Sharma N., Kakkar R. Gallic acid: A versatile antioxidant with promising therapeutic and industrial applications // *RSC Advances*, 2015, vol. 5, is. 35, pp. 27540–27557. doi: 10.1039/c5ra01911g
15. Škorňa P., Michalík M., Klein E. Gallic acid: thermodynamics of the homolytic and heterolytic phenolic O–H bonds splitting-off // *Acta Chimica Slovaca*, 2016, vol. 9, is. 2, pp. 114–123. doi: 10.1515/acs-2016-0020
16. Li X., Ouyang X., Liang M., Chen D. Comparative analysis of radical adduct formation (RAF) products and antioxidant pathways between myricetin-3-O-galactoside and myricetin aglycone // *Molecules*, 2019, vol. 24, is. 15. doi: 10.3390/molecules24152769
17. Luyt A. S., Molefi J. A., Krump H. Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites // *Polymer Degradation and Stability*, 2006, vol. 91, no. 7, pp. 1629–636. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2005.09.014
18. Nydegger M., Deshmukh R., Tervoort E., Niederberger M., Caseri W. Composites of Copper Nanowires in Polyethylene: Preparation and Processing to Materials with NIR Dichroism // *ACS omega*, 2019, vol. 4, no. 6, pp. 11223–11228. doi: 10.1021/acsomega.9b01077
19. Zhang W., Xia X., Qi C., Xie C., Cai S. A porous Cu/LDPE composite for copper-containing intrauterine contraceptive devices // *Acta Biomaterialia*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 897–903. doi: 10.1016/j.actbio.2011.09.024
20. Воробьева Е. В., Попов А. А. Биоразлагаемые композиты на основе ископаемых видов сырья. Часть I: стратегии получения, характерные свойства и развитие рынка (обзор) // *Полимерные материалы и технологии*. 2022. Т. 8, № 2. С. 6–24. doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-2-6-24
21. Li A. S. H., Bandy B., Tsang S. S., Daviso, A. J. DNA-breaking versus DNA-protecting activity of four phenolic compounds in vitro // *Free radical research*, 2000, vol. 33, is. 5, pp. 551–566. doi: 10.1080/1071576000301091
22. Masoud M. S., Hagagg S. S., Ali A. E., Nasr N. M. Synthesis and spectroscopic characterization of gallic acid and some of its azo complexes // *Journal of Molecular Structure*, 2012, vol. 1014, pp. 17–25. doi: 10.1016/j.molstruc.2012.01.041
23. Rocha J. E., Guedes T. T., Bezerra C. F., Costa M. D. S., Campina F. F., de Freitas T. S., Souza A. K., Sobral Souza C. E., de Matos Y. M. L. S., Pereira-Junior F. N., da Silva J. H., Menezes I. R. A., Teixeira R. N. P., Colares A. V., Coutinho H. D. Identification of the gallic acid mechanism of action on mercury chloride toxicity reduction using infrared spectroscopy and antioxidant assays // *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, vol. 141, pp. 24–29. doi: 10.1016/j.ibiod.2018.07.002
24. Джасим А. Р. Я. Координационные соединения некоторых металлов с гидроксид- и гидразинпроизводными бензойной кислоты в качестве предшественников наноразмерных оксидных катализаторов = Coordination compounds of some metals with hydroxy and hydrazine derivatives of benzoic acid as precursors of nanosized oxide catalysts : дис. канд. хим. наук : 02.00.01. Москва, 2021. 120 с.
25. Бучаченко А. Л., Вассерман А. М. Стабильные радикалы. Электронное строение, реакционная способность и применение. Москва : Химия, 1973. 408 с.
26. Agrawal M. D., Bhandari C. S., Dixit M. K., Sogani N. C. 3, 4, 5-Trihydroxybenzoic acid as chelating agent, I: Praseodymium // *Monatshefte für Chemie*, 1976, vol. 107, pp. 75–82. doi: 10.1007/BF00909083
27. Lundbäck M., Hedenqvist M. S., Mattozzi A., Gedde U. W. Migration of phenolic antioxidants from linear and branched polyethylene // *Polymer Degradation and Stability*, 2006, vol. 91, no. 7, pp. 1571–15800.
28. Richaud E., Monchy-Leroy C., Colin X., Audouin L., Verdu J. Kinetic modelling of stabilization coupled with stabilizer loss by evaporation. Case of dithioester stabilized polyethylene // *Polymer Degradation and Stability*, 2009, vol. 94, no. 11, pp. 2004–2014.
29. Шляпников Ю. А., Киришкин С. Г., Марьин А. П. Антиокислительная стабилизация полимеров. Москва : Химия, 1986. 252 с.
30. Воробьева, Е. В. Физико-химические изменения антиоксиданта фенольного типа при многократных фазовых переходах стабилизированного полиэтилена // *Химическая физика*. 2020. Т. 39, № 5. С. 33–42. doi: 10.31857/S0207401X20050143
31. Инфракрасная спектроскопия полимеров : пер. с нем / под ред. И. Деханта. Москва : Химия, 1976. 472 с.
32. Лин Д. Г., Воробьева Е. В. Эффективность фенольного антиоксиданта при различных способах его введения в полиэтилен, содержащий дисперсные наполнители // *Журнал прикладной химии*. 2013. Т. 85, № 1. С. 89–95.
33. Лин Д. Г., Воробьева Е. В., Шаповалов В. М. Влияние химически инертных наполнителей на эффективность ингибирования полиэтилена антиоксидантами // *Журнал прикладной химии*. 2014. Т. 87, № 7. С. 966–973.

References

1. Jamshidian M., Tehrani E. A., Desobry S. Release of synthetic phenolic antioxidants from extruded poly lactic acid (PLA) film. *Food Control*, 2012, vol. 28, is. 2, pp. 445–455. doi: 10.1016/j.foodcont.2012.05.005
2. Xu X., Liu A., Hu S., Ares I., Martínez-Larrañaga M.-R., Wang Xu, Martínez M., Anadón A., Martínez M.-A. Synthetic phenolic antioxidants: Metabolism, hazards and mechanism of action. *Food Chemistry*, 2021, vol. 353. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129488
3. Tátraaljai D., Major L., Földes E., Pukánszky B. Study of the effect of natural antioxidants in polyethylene: Performance of β -carotene. *Polymer degradation and stability*, 2014, vol. 102, pp. 33–40. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2014.02.012
4. Kirschweg B., Tátraaljai D., Földes E., Pukánszky B. Efficiency of curcumin, a natural antioxidant, in the processing stabilization of PE: concentration effects. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, vol. 118, pp. 17–23. doi: 10.1016/j.polyimdegradstab.2015.04.006
5. Spece H., Yarbrough R. V., Kurtz S. M. In Vivo Performance of Vitamin E Stabilized Polyethylene Implants for Total Hip Arthroplasty: A Review. *The Journal of arthroplasty*, 2023, vol. 38, is. 5, pp. 970–979. doi: 10.1016/j.arth.2022.11.010
6. Vorobyova E. V. Osobennosti proyavleniya antiokislitel'nykh svoystv gidroliznogo lignina v sostave polietilenovykh plenok, antagonizm lignina i ekstraktov lishaynikov [Features of manifestation of antioxidant properties of hydrolysis lignin in polyethylene films, antagonism of lignin and lichen extracts]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant materials], 2024, no. 1, pp. 83–94. doi: 10.14258/jcpm.20240112005
7. Masek A. Flavonoids as natural stabilizers and color indicators of ageing for polymeric materials. *Polymers*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 1125–1144. doi: 10.3390/polym7061125
8. Gallic acid. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Gallic_acid (accessed 03.05.2024).
9. Ji H.-F., Zhang H.-Y., Shen L. Proton dissociation is important to understanding structure–activity relationships of gallic acid antioxidants.

- Bioorganic & medicinal chemistry letters*, 2006, vol. 16, is. 15, pp. 4095–4098. doi: 10.1016/j.bmcl.2006.04.096
10. Denisov E. T. *Oksilenie i destruktivnyye karbotsepykh polimerov* [Oxidation and destruction of carbon chain polymers]. Leningrad : Khimiya Publ., 1990. 286 p.
11. Lin D. G., Vorobyova E. V., Marchenko N. V. Vliyanie medi na oksilenie polietilena, sodержashchego antioksidanty [Effect of Copper on Oxidation of Polyethylene Containing Antioxidants]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2005, vol. 78, is. 9, pp. 1527–1532.
12. Denisov E. T., Denisova T. G. Reaktsionnaya sposobnost' prirodnykh fenolov [Reactivity of natural phenols]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2009, vol. 78, no. 11, pp. 1129–1155.
13. Alberti A., Amorati R., Campredon M., Lucarini M., Macciantelli D., Pedulli G. Antioxidant activity of some simple phenols present in olive oil. *Acta Alimentaria*, 2009, vol. 38, no. 4, pp. 427–436. doi: 10.1556/AAlim.38.2009.4.3
14. Badhani B., Sharma N., Kakkar R. Gallic acid: A versatile antioxidant with promising therapeutic and industrial applications. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, is. 35, pp. 27540–27557. doi: 10.1039/c5ra01911g
15. Škorňa P., Michalik M., Klein E. Gallic acid: thermodynamics of the homolytic and heterolytic phenolic O–H bonds splitting-off. *Acta Chimica Slovaca*, 2016, vol. 9, is. 2, pp. 114–123. doi: 10.1515/acs-2016-0020
16. Li X., Ouyang X., Liang M., Chen D. Comparative analysis of radical adduct formation (RAF) products and antioxidant pathways between myricetin-3-O-galactoside and myricetin aglycone. *Molecules*, 2019, vol. 24, is. 15. doi: 10.3390/molecules24152769
17. Luyt A. S., Molefi J. A., Krump H. Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, vol. 91, no. 7, pp. 1629–636. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.09.014
18. Nydegger M., Deshmukh R., Tervoort E., Niederberger M., Caseri W. Composites of Copper Nanowires in Polyethylene: Preparation and Processing to Materials with NIR Dichroism. *ACS omega*, 2019, vol. 4, no. 6, pp. 11223–11228. doi: 10.1021/acsomega.9b01077
19. Zhang W., Xia X., Qi C., Xie C., Cai S. A porous Cu/LDPE composite for copper-containing intrauterine contraceptive devices. *Acta Biomaterialia*, 2012, vol. 8, no. 2, pp. 897–903. doi: 10.1016/j.actbio.2011.09.024
20. Vorobyova E. V., Popov A. A. Biorazlagaemye kompozity na osnove iskopaemykh vidov syr'ya. Chast' I: strategii polucheniya, kharakternye svoystva i razvitiye rynka (obzor) [Biodegradable composites based on fossil types of raw materials. Part I. obtaining strategies, characteristics and market development (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2022, vol. 8, no. 2, pp. 6–24. doi: 10.32864/polymmattech-2022-8-2-6-24
21. Li A. S. H., Bandy B., Tsang S. S., Daviso, A. J. DNA-breaking versus DNA-protecting activity of four phenolic compounds in vitro. *Free radical research*, 2000, vol. 33, is. 5, pp. 551–566. doi: 10.1080/10715760000301091
22. Masoud M. S., Hagagg S. S., Ali A. E., Nasr N. M. Synthesis and spectroscopic characterization of gallic acid and some of its azo complexes. *Journal of Molecular Structure*, 2012, vol. 1014, pp. 17–25. doi: 10.1016/j.molstruc.2012.01.041
23. Rocha J. E., Guedes T. T., Bezerra C. F., Costa M. D. S., Campina F. F., de Freitas T. S., Souza A. K., Sobral Souza C. E., de Matos Y. M. L. S., Pereira-Junior F. N., da Silva J. H., Menezes I. R. A., Teixeira R. N. P., Colares A. V., Coutinho H. D. Identification of the gallic acid mechanism of action on mercury chloride toxicity reduction using infrared spectroscopy and antioxidant assays. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, vol. 141, pp. 24–29. doi: 10.1016/j.ibiod.2018.07.002
24. Dzhassim A. R. Ya. Koordinatsionnye soedineniya nekotorykh metallov s gidroksi- i gidrazinproizvodnymi benzoynoy kisloty v kachestve predshestvennikov nanorazmernykh oksidnykh katalizatorov. Diss. kand. khim. nauk [Coordination compounds of some metals with hydroxy and hydrazine derivatives of benzoic acid as precursors of nanosized oxide catalysts. PhD chem. sci. diss.]. Moscow, 2021. 120 p.
25. Buchachenko A. L., Vasserman A. M. *Stabil'nye radikal'y. Elektronnoe stroenie, reaktsionnaya sposobnost' i primeneniye* [Stable Radicals: Electronic Structure, Reactivity, and Applications]. Moscow : Khimiya Publ., 1973. 408 p.
26. Agrawal M. D., Bhandari C. S., Dixit M. K., Sogani N. C. 3, 4, 5-Trihydroxybenzoic acid as chelating agent, I: Praseodymium. *Monatshefte für Chemie*, 1976, vol. 107, pp. 75–82. doi: 10.1007/BF00909083
27. Lundbäck M., Hedenqvist M. S., Mattozzi A., Gedde U. W. Migration of phenolic antioxidants from linear and branched polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, vol. 91, no. 7, pp. 1571–15800.
28. Richaud E., Monchy-Leroy C., Colin X., Audouin L., Verdu J. Kinetic modelling of stabilization coupled with stabilizer loss by evaporation. Case of dithioester stabilized polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, vol. 94, no. 11, pp. 2004–2014.
29. Shlyapnikov Yu. A., Kiryushkin S. G., Mar'in A. P. *Antioksilitel'naya stabilizatsiya polimerov* [Antioxidant stabilization of polymers]. Moscow : Khimiya Publ., 1986. 252 p.
30. Vorobyova, E. V. Fiziko-khimicheskie izmeneniya antioksidanta fenol'nogo tipa pri mnogokratnykh fazovykh perekhodakh stabilizirovannogo polietilena [Physicochemical changes of phenolic antioxidant during multiple phase transitions of stabilized polyethylene]. *Khimicheskaya fizika* [Russian Journal of Physical Chemistry], 2020, vol. 39, no. 5, pp. 33–42. doi: 10.31857/S0207401X20050143
31. *Infrakrasnaya spektroskopiya polimerov* [Infrared spectroscopy of polymers]. Ed. I. Dekhant. Moscow : Khimiya Publ., 1976. 472 p.
32. Lin D. G., Vorobyova E. V. Effektivnost' fenol'nogo antioksidanta pri razlichnykh sposobakh ego vvedeniya v polietilen, sodержashchiy dispersnye napolniteli [Efficiency of phenolic antioxidant with different methods of its introduction into polyethylene containing dispersed fillers]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2013, vol. 85, no. 1, pp. 89–95.
33. Lin D. G., Vorobyova E. V., Shapovalov V. M. Vliyanie khimicheskii inertnykh napolniteley na effektivnost' ingibirovaniya polietilena antioksidantami [Influence of chemically inert fillers on the efficiency of polyethylene inhibition by antioxidants]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2014, vol. 87, no. 7, pp. 966–973.