

Статья поступила в редакцию: 30.07.2026

Статья принята к публикации: 09.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 678.5+691.3

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23291

Исследование влияния антипирена на основе циануровой кислоты и оксидов алюминия-кремния на реологические свойства, кислородный индекс и огнеустойчивость в композитах на основе полиэтилена F-0220

Эсанова Рашида Рахмадович

исследователь, Термезский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Термез

Тураева Хайита Худайназарович
проф.

Термезский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Термез

Тожиева Панжи Жовлиевич
д-р техн. наук

доц. Термезский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Термез

Сафаров Азамат Маматали угли

д-р филос. по техн. наукам, Термезский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Термез

Равшанова Сожида Сафаровна
студент

направления образования Химия Термезский государственный педагогический институт
Республика Узбекистан, г. Термез

E-mail: azamatsafarov905@gmail.com

A study of the influence of a fire retardant based on cyanuric acid and aluminum-silicon oxides on rheological properties, oxygen index and fire resistance in composites based on polyethylene F-0220

Esanov Rashida Rakhmadovich

Researcher

Termez State Pedagogical Institute

Republic of Uzbekistan, Termez

Turayev Khayit Khudaynazarovich

professor

Termez State University

Republic of Uzbekistan, Termez

Tozhiev Panzhi Zhovlievich

doctor of technical sciences, Associate professor

Termez State Pedagogical Institute

Republic of Uzbekistan, Termez

Safarov Azamat Mamatali ugli

doctor of philosophy in technical sciences, Termez State University

Republic of Uzbekistan, Termez

Ravshanova Sozhida Safarovna

student of the Chemistry education direction

Termez State Pedagogical Institute

Republic of Uzbekistan, Termez

Аннотация

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния антипирена на основе циануровой кислоты и алюмосиликатных оксидов (оксидов алюминия и кремния) на реологические свойства, показатель текучести расплава (СОК), кислородный индекс и огнестойкость композиционных материалов на основе полиэтилена марки F-0220. Композиты С-10–С-50 с различным содержанием наполнителей были получены методом экструзии на двухшнековом экструдере при температурном режиме 160–210°C. Установлено, что введение азотно-фосфорного антипирена на основе циануровой кислоты снижает показатель текучести расплава полиэтилена с 2,3–2,5 до 1,8–1,9 г/10 мин, что создаёт благоприятные реологические условия для введения оксидов алюминия и кремния в высоких концентрациях. Показано, что по мере увеличения доли минеральных наполнителей кислородный индекс композитов возрастает с 20,4 % (чистый ПЭ) до 31,2 % (образец С-50), а продолжительность беспламенного горения отдельных образцов (С-30) достигает 285 секунд. Выявлен синергетический характер взаимодействия антипирена и минеральных оксидов, заключающийся в ограничении подвижности полимерных цепей и формировании теплопоглощающего карбонизированного защитного слоя. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых огнестойких полимерных композиционных материалов с улучшенными технологическими и эксплуатационными свойствами.

Библиографическое описание: Исследование влияния антипирена на основе циануровой кислоты и оксидов алюминия-кремния на реологические свойства, кислородный индекс и огнестойчивость в композитах на основе полиэтилена F-0220 // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Эсанова Р.Р. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23291>

Abstract

This article presents the results of an experimental investigation into the effects of a cyanuric acid-based flame retardant combined with aluminum–silicon oxides on the rheological properties, melt flow index (MFI), limiting oxygen index (LOI), and flame resistance of polyethylene F-0220-based composite materials. Composite samples (S-10–S-50) with varying filler content were prepared by melt compounding on a twin-screw extruder at a temperature range of 160–210°C. It was found that the incorporation of the nitrogen-phosphorus flame retardant based on cyanuric acid reduced the melt flow index of polyethylene from 2.3–2.5 to 1.8–1.9 g/10 min, creating favorable rheological conditions for introducing aluminum and silicon oxides at high concentrations. As the mineral filler content increased, the limiting oxygen index rose from 20.4 % (neat PE) to 31.2 % (sample S-50), while the non-flaming burning duration of certain samples (S-30) reached 285 seconds. A synergistic interaction between the flame retardant and mineral oxides was identified, restricting polymer chain mobility and promoting the formation of a heat-absorbing carbonized protective layer. The obtained results provide a scientific basis for the development of flame-retardant polymer composite materials with improved technological and service properties.

Ключевые слова: полиэтилен F-0220, композит, пиролиз, кислородный индекс, показатель СОК, оксид алюминия, оксид кремния, циануровая кислота.

Keywords: polyethylene F-0220, composite, pyrolysis, oxygen index, MFI (COK) index, aluminum oxide, silicon oxide, cyanuric acid.

Введение

В последние годы вопрос повышения огнестойкости полимерных материалов признаётся одним из приоритетных научных направлений в области материаловедения и полимерной химии. В частности, материалы на основе полиэтилена широко применяются в строительной, электротехнической, транспортной и других отраслях промышленности благодаря низкой плотности, высокой механической прочности, устойчивости к коррозии и химическим воздействиям, а также экономической эффективности. Однако высокая горючесть полиэтилена и его легковоспламеняемость под термическим воздействием существенно ограничивают его эксплуатационные возможности и создают определённые проблемы при обеспечении требований пожарной безопасности.

Поэтому разработка методов модификации, направленных на эффективное улучшение реологических, термофизических и огнестойких свойств полиэтиленовой матрицы, а также научное исследование влияния различных антипиренов и минеральных наполнителей на свойства полимерной композиции имеет актуальное научно-практическое значение.

Антипирены на основе фосфора-азота обладают multifunctional механизмами действия при повышении огнестойкости полимерных композитов, замедляя радикальные цепные реакции в газовой фазе и ускоряя формирование защитного слоя за счёт усиления карбонизации в фазе конденсации. В частности, производные циануровой кислоты в определённой степени снижают показатель текучести полиэтилена и повышают вязкость материала, что создаёт благоприятные реологические условия для введения оксидов алюминия и кремния в качестве наполнителя в высоких концентрациях. Увеличение доли

минеральных наполнителей, в свою очередь, способствует формированию в составе композита устойчивого слоя, поглощающего тепло, стимулирующего карбонизацию и ограничивающего распространение огня.

Основной целью настоящего исследования является научный анализ механизмов изменения реологических свойств, теплостойкости и кислородного индекса полиэтиленовых композитов под воздействием антипиренов на основе циануровой кислоты. Задачи исследования включают: изучение огнестойких свойств полимерных композитов, изготовленных на основе полиэтилена Ф-0220 и содержащих различные количества минеральных модификаторов и антипирен на основе циануровой кислоты; анализ механизмов изменения показателя текучести расплава и кислородного индекса на фоне постепенного увеличения доли алюминиево-кремнистой смеси в образцах от С-10 до С-50; выявление синергетических закономерностей взаимодействия антипирена и минеральных оксидов в полиэтиленовой матрице.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использован полиэтилен марки F-0220, модифицированный антипиреном азотно-фосфорной природы на основе циануровой кислоты и минеральными наполнителями — оксидами алюминия и кремния. Составы исследованных композитов (образцы С-10–С-50) с указанием массовой доли полиэтилена, оксидов алюминия-кремния и антипирена на основе циануровой кислоты приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Составы исследованных композитов (образцы С-10–С-50) с указанием массовой доли полиэтилена, оксидов алюминия-кремния и антипирена на основе циануровой кислоты

№	Тип образца	Полиэтилен F-0220, %	Оксиды алюминия-кремния, %	Антипирен на основе циануровой кислоты, %	СОК (г/10 мин)
1	ПЭ (контроль)	100	0	0	2.1–2.3
2	С-10	90	5	5	2.3
3	С-20	80	10	10	2.2
4	С-30	70	20	10	2.1
5	С-40	60	30	10	2.0
6	С-50	50	40	10	1.9

Показатели СОК композитов с добавлением полиэтилена F-0220 и антипиренов на основе оксидов алюминия и кремния, а также циануровой кислоты определены при температуре 190°C и нагрузке 2,16 кг в соответствии с требованиями ГОСТ 11645-80.

С целью оценки реологических свойств композитов, полученных в присутствии антипиренов на основе полиэтилена, оксидов алюминия и кремния, а также циануровой кислоты, материалы обрабатывались на двухвинтовом экструдере. Выбранный для экструзионного процесса температурный диапазон 160–210°C позволил обеспечить максимально равномерное смешивание компонентов при сохранении термомеханической

стабильности полимера. Оптимальное распределение температуры экструдера по зонам — 160–170°C, 180–190°C и 200–210°C — обеспечивало плавление полимерной матрицы, а модификаторы равномерно распределялись по матрице.

Показатель текучести расплавов (ПТР) определяли на вискозиметре ГТ-МФИ-450 при нагрузке 2,16 кг и температуре 190°C в соответствии с требованиями ГОСТ 11645-73. На основании полученных данных изучалось изменение реологического состояния полиэтиленовой матрицы при введении антипиренов на основе оксидов алюминия и кремния, а также циануровой кислоты азотно-фосфорной природы.

Физико-геометрические показатели (рост, ширина, толщина, масса) и огнестойкие характеристики (продолжительность горения, кислородный индекс) образцов, изготовленных на основе чистого полиэтилена (контроль) и композиций С-10–С-50 с поэтапно сниженной долей полимера и увеличенным количеством минеральных наполнителей, приведены в таблице 2.

Результаты и обсуждение

Реологические свойства композитов. Результаты исследований показали, что для неочищенного ПЭ Ф-0220 СОК составляет около 2,1–2,3 г/10 мин, а с введением дополнительных компонентов вязкость раствора снижается. Это состояние последовательно проявлялось в композитах от образца С-10 до образца С-50, при этом отмечалось снижение значений СОК с 2,3 до 1,9 г/10 мин (таблица 1). Последовательное снижение значений СОК связано с тем, что антипирены и минеральные наполнители ограничивают макромолекулярное движение в полиэтиленовой матрице. Особенно ярко замедляющее действие сегментарного движения азотно-фосфорных антипиренов проявляется в композитах с долей полиэтилена менее 70 %. В результате увеличивается вязкость раствора и снижается текучесть, что создаёт преимущество при технологической переработке композитов с высоким содержанием наполнителя.

Отмечено, что в результате воздействия азота и фосфора в составе антипирена на полимерные цепи реологическая подвижность полиэтилена снижается, а молекулярная динамика замедляется. Это облегчило равномерное проникновение наполнителей в полимерную матрицу в больших количествах на этапе экструзии. Оксиды алюминия и кремния, в свою очередь, нормализовали общую плавкость системы и способствовали стабильному распределению твёрдой фазы в составе композита. Снижение коэффициента текучести имеет технологически важное значение: доведение доли наполнителей до 30–40 % в образцах С-40 и С-50, имеющих самые низкие реологические показатели, стало возможным без нарушения стабильности экструзионного процесса. Эта тенденция расширяет возможности получения высокоминерально-модифицированных композитов, значительно повышая их стойкость к истиранию, термическому воздействию и горючести.

Кислородный индекс и огнестойкость композитов. Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что изменение состава композиции оказывает значительное влияние на значения кислородного индекса (таблица 2). При кислородном индексе 20,4 % (по другим измерениям — 19,4 %) в чистом полиэтилене, в результате добавления антипирена и минеральных оксидов этот показатель увеличился до 25 % в образце С-1, до 26,1 % в образце С-20, до 28,2 % в образце С-30. Самые высокие значения отмечены в образцах С-40

и С-50 и составили 30,3 % и 31,2 % соответственно. Данная тенденция объясняется свойствами оксидов алюминия и кремния стимулировать карбонизацию и ограничивать теплоотдачу.

Таблица 2.

Кислородный индекс и огнестойкость композитов

№	Процент	Рост, см	Ширина, см	Толщина, см	Масса, г	Время, с	Кислородный индекс, %
ПЭ	100%	3.5	2.5	0.4	2.74	179	19.4
S-10	90%	3.7	2.8	0.4	2.94	153.6	25
S-20	80%	3.9	2	0.4	2.9	238.8	26.1
S-30	70%	3.4	2.7	0.4	3	285	28.2
S-40	60%	3.5	2.2	0.4	2.89	185	30.3
S-50	50%	3.7	2.7	0.4	2.8	121	31.2

Изменение доли состава образцов композитов на основе полиэтилена и изменение показателей кислородного индекса

Показатели времени горения композитов также существенно зависят от изменения состава: некоторые образцы (в частности, С-30) продемонстрировали высокую огнестойкость, продержавшись без горения до 285 секунд. Небольшие различия в геометрических размерах образцов определяются реологическими изменениями на стадии их формирования, что напрямую связано с влиянием антипиренов на текучесть полиэтилена. Высокая доля минеральных наполнителей способствует формированию в полимерной матрице защитного слоя, замедляющего тепловой поток, в результате чего скорость окисления резко снижается.

Наблюдения показали, что хотя с увеличением доли наполнителей масса композита стала относительно стабильной, степень огнестойкости и сопротивления процессу окисления значительно возросла. Также зависимость между продолжительностью горения и массой образцов выявила влияние элементов состава на теплоустойчивость.

Таким образом, полученные результаты показали, что реологические и огнестойкие изменения в системе полиэтилен–антипирен–минеральный наполнитель имеют синергетический характер взаимодействия компонентов. Азотно-фосфорные антипирены ограничивают подвижность полимерных цепей и позволяют вводить в полимерную матрицу большое количество наполнителей; минеральные оксиды алюминия и кремния оказывают стабилизирующий эффект на текучесть и одновременно стимулируют карбонизацию, ограничивая теплоотдачу. Азотно-фосфорные антипирены не только активируют реакции радикального захвата в газовой фазе, но и стабилизируют продукты неполного разложения полимера в фазе конденсации, ускоряя образование защитного слоя. Такое комплексное взаимодействие является важным фактором оптимизации технологических процессов получения высокоогнестойких композитов и повышения их эксплуатационных свойств.

Заключение

В результате проведённых исследований установлено, что комплексное введение в состав полиэтилена Ф-0220 азотно-фосфорного антипирена на основе циануровой кислоты и минеральных наполнителей (оксидов алюминия и кремния) оказывает существенное влияние на реологические, теплофизические и огнестойкие свойства получаемых композитов.

Показано, что наличие элементов азота и фосфора в составе антипирена значительно снижает показатель текучести расплава полиэтилена — с исходных значений 2,3–2,5 г/10 мин до 1,8–1,9 г/10 мин. Данное реологическое изменение повышает вязкость полимерной матрицы и создаёт технологические условия для введения повышенного количества минеральных наполнителей без нарушения стабильности экструзионного процесса.

Установлено, что по мере уменьшения доли полимера и увеличения доли наполнителей кислородный индекс композитов возрастает с 20,4 % до 31,2 %, что свидетельствует о значительном повышении их огнестойкости в результате синергического взаимодействия антипирена и минеральных оксидов; продолжительность беспламенного горения отдельных образцов (С-30) достигает 285 секунд.

Таким образом, комплексное применение азотно-фосфорных антипиренов на основе циануровой кислоты и минеральных наполнителей в композитах на основе полиэтилена Ф-0220 представляет собой эффективную стратегию повышения огнестойкости при сохранении технологичности переработки. Полученные научные выводы имеют практическое значение для формирования высоконаполненных композиций и управления их функциональными свойствами при разработке огнеупорных полимерных материалов на основе термопластов, а также при выборе оптимального состава и совершенствовании технологических процессов производства полимерных материалов с высоким кислородным индексом.

Список литературы

1. Chambhare S.U., Lokhande G.P., Jagtap R.N. UV-curable behavior of phosphorus- and nitrogen-based reactive diluent for epoxy acrylate oligomer used for flame-retardant wood coating // J. Coatings Technol. Res. – 2016. – Т. 13, № 4.
2. Dou J., Xie Y., Chen R., Qin Y. Study on the Dispersion and Processing Performance of Activated Aluminum Hydroxide/Ammonium Polyphosphate Composite Flame Retardant System for Vinyl Ester Resin // Polymers. – 2025. – Т. 17, № 5.
3. Gou T. et al. Novel phosphorus/nitrogen-rich oligomer with numerous reactive groups for durable flame-retardant cotton fabric // Cellulose. – 2021. – Т. 28, № 11.
4. Guo C., Zhao Y., Ji G., Wang C., Peng Z. Organic Aluminum Hypophosphite/Graphitic Carbon Nitride Hybrids as Halogen-Free Flame Retardants for Polyamide 6 // Polymers. – 2020. – Т. 12, № 10.
5. Howell B.A., Dumitrascu A. Thermal and combustion characteristics of phosphorus and phosphorus/nitrogen-containing styrene monomers and oligomers // J. Therm. Anal. Calorim. – 2012. – Т. 109, № 3.

6. Kablov V.F. et al. Development of phosphorus-boron-nitrogen-containing modifier for elastomeric compositions // Polym. Sci. Ser. D. – 2016. – Т. 9, № 2.
7. Zhang D., Lei L., Shang Y. Phosphorus and nitrogen dual doped ordered mesoporous carbon with tunable pore size for supercapacitors // J. Mater. Sci. Mater. Electron. – 2015. – Т. 27, № 4.
8. Zhang Z., Yang M., Cai K., Chen Y., Liu S., Liu W., Liu J. Effect of the Flame Retardants and Glass Fiber on the Polyamide 66/Polyphenylene Oxide Composites // Materials. – 2022. – Т. 15, № 3.
9. Zhang J., Yan W., Huang W. et al. Construction of Fire-Retardant PEO Composite Based on Calcium Sulfate Whiskers Fabricated from Phosphogypsum and DOPO Derivatives // Polymers. – 2025. – Т. 17, № 12. – DOI: 10.3390/polym17121588.
10. Zhang, D. Flame retardancy properties and rheological behavior of PP/DiDOPO conjugated flame retardant composites / D. Zhang, X. Shang, J. Luo [et al.] // Frontiers in Chemistry. – 2022. – Т. 10.