

ДЛИТЕЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОЧЕНЬ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

А.Л. Федоров

Е.С. Петухова

А.Г. Аргунова

gelvirb@mail.ru

evgspar@rambler.ru

ag_argunova@mail.ru

ИПНГ СО РАН ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты исследования климатической стойкости полиэтилена низкого давления, содержащего стабилизирующие добавки различных марок. Экспонирование полиэтилена осуществлялось в условиях очень холодного климата (Якутск, Республика Саха (Якутия)). Согласно результатам исследования физико-механических характеристик, окислительная деструкция полиэтилена низкого давления начинается в процессе изготовления опытных образцов, что отражается на относительном удлинении при разрыве исходного образца после вальцевания. Введение стабилизирующих добавок положительно влияет на деформационные характеристики полимера, поэтому добавки выполняют функцию термостабилизации и пластификации. Показано, что на начальном этапе экспонирования (до шести месяцев) в материалах протекают преимущественно реакции межмолекулярного сшивания. Увеличение продолжительности испытаний приводит к преобладанию реакций разрыва полимерных цепей над реакциями сшивания, о чем свидетельствует резкое снижение вязкости расплава. В соответствии с результатами ИК спектроскопических исследований введение стабилизаторов приводит к изменению механизмов процессов, протекающих при старении. Климатическое старение полиэтилена низкого давления без стабилизаторов характеризуется преимущественным протеканием реакций диспропорционирования, сопровождающихся накоплением винильных групп, в то время как материалы со стабилизаторами проявляют

Ключевые слова

Полиэтилен низкого давления, климатические испытания, физико-механические характеристики, показатель текучести расплава, ИК спектроскопические исследования

склонность к накоплению карбонильных групп. По совокупности результатов исследования наилучшую стойкость к воздействию климатических факторов в условиях очень холодного климата, характеризующегося чрезвычайно низкими температурами в зимний период и высоким уровнем солнечной радиации, проявляют материалы, содержащие гибридные бифункциональные стабилизаторы марок СО-3 и СО-4

Поступила 31.03.2025

Принята 25.04.2025

© Автор(ы), 2026

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (рег. № 122011100162-9) с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН

Введение. Экстремальные климатические условия северных и арктических регионов Российской Федерации требуют особого подхода к выбору материалов, предназначенных для эксплуатации в различных узлах техники и технологических системах. Разрушительное воздействие низких температур окружающего воздуха, их сезонные и суточные перепады и переходы через нуль, высокий уровень солнечной радиации и пр. приводят к необратимым изменениям в структуре и свойствах полимерных материалов, и, следовательно, к неисправностям и выходу из строя изделий и конструкций.

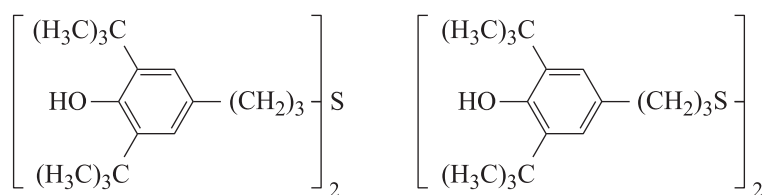
Результаты многочисленных исследований показали [1–5], что наиболее агрессивным фактором при старении полимерных материалов, в частности полиолефинов, является воздействие солнечного излучения, которое инициирует протекание радикальных цепных реакций, сопровождающихся разрывом и сшиванием макромолекулярных цепей, а также процессов окисления при взаимодействии с кислородом воздуха, т. е. при старении полимера изменяется его надмолекулярная структура [6–10]. В состав промышленных марок полиолефинов для защиты от воздействия солнечного излучения вводят либо специальные вещества (стабилизаторы), прерывающие протекание радикальных цепных реакций, либо пигменты, обеспечивающие физическое поглощение и последующее рассеивание солнечного излучения. В НИОХ СО РАН разработаны способы получения высокоэффективных стабилизаторов полимерных материалов, применение которых, кроме повышения стойкости к климатическому воздействию, может обеспечить импортозамещение в этой области, что является актуальной задачей.

Цель работы — оценка длительной климатической стойкости материалов на основе полиэтилена низкого давления (ПЭНД) марки «Снолен»

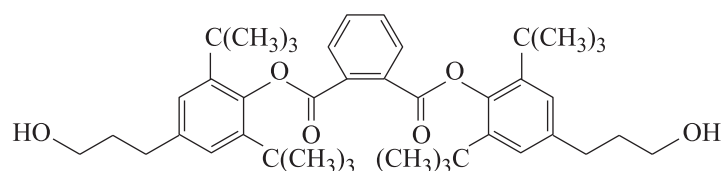
ЕР 0.26/51N, содержащего стабилизаторы различных марок производства НИОХ СО РАН, в климатических условиях Республики Саха (Якутия).

Объекты и методы исследования. В качестве полимерной матрицы использован ПЭНД марки «Снолен» ЕР 0.26/51N (ООО «Газпром Нефтехим Салават», Российская Федерация). В промышленном исполнении этот ПЭНД содержит несколько функциональных добавок, которые наряду с уникальной надмолекулярной структурой обеспечивают высокую стойкость изделий (преимущественно технологических труб) к воздействию углеводородной среды, высокую прочность и повышенную теплостойкость [11]. Для оценки эффективности новых стабилизирующих добавок для повышения климатической стойкости ПЭНД в условиях Республики Саха (Якутия) здесь использован полимер без промышленных добавок.

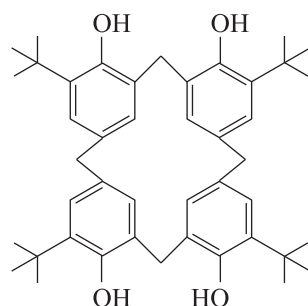
В качестве добавок, обеспечивающих защиту ПЭНД от воздействия естественных климатических факторов, применены стабилизаторы марок СО-3, СО-4, тиолы (γ -меркаптан), каликсарен и стафен (НИОХ СО РАН). Структурные формулы стабилизирующих добавок марок СО-3, СО-4



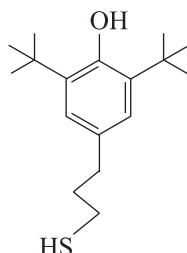
стафена



каликсарена



тиола



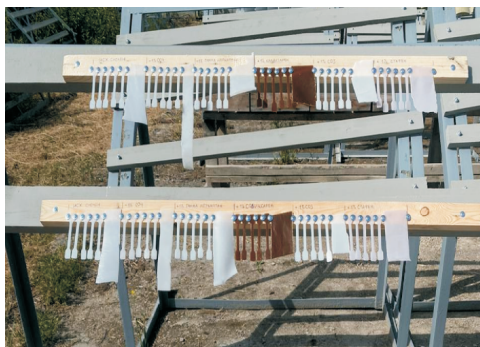
Выбранные стабилизирующие добавки представляют собой пространственно-затрудненные фенолы, высокая эффективность применения которых для повышения стойкости полимерных материалов определяется высокой подвижностью атома водорода гидроксильной группы. Стабилизаторы марок СО-3, СО-4, тиол, кроме гидроксильной группы, содержат сульфидные группы, которые также участвуют в реакциях, прерывающих радикальные цепные реакции. Ожидается, что за счет синергетического эффекта применения бифункциональных (гибридных) стабилизаторов стойкость полимеров к окислительной деструкции будет выше по сравнению со стабилизаторами, содержащими только гидроксильную группу [12, 13].

Программа длительных климатических испытаний составлена с учетом требований ГОСТ 9.708–83. Образцы экспонировали в следующих условиях: на открытом стенде на полигоне климатических испытаний «Якутск»; под навесом на полигоне климатических испытаний «Якутск». Контрольные образцы хранились в отапливаемом помещении без доступа света.

Экспериментальные работы по исследованию климатической стойкости ПЭНД со стабилизаторами инициированы 06.07.2023 и рассчитаны по рекомендациям ГОСТ 9.708–83 на 15 месяцев с этапами выемки после 1, 3, 6, 9, 12 и 15 месяцев экспонирования.

Образцы изготавливали методом вальцевания при температуре 180 °С. Порошкообразный полимер переводили в расплав, затем в кипящий слой, образующийся в межвалковом зазоре, постепенно вводили стабилизирующую добавку массовым содержанием 1,0 % (масс.). Продолжительность смешения 10 мин. Из сформированной пластины вырубали образцы-лопатки типа 5 (ГОСТ 11262–2017) для определения деформационно-прочностных характеристик материалов при растяжении, а также вырезали небольшой фрагмент для изучения других плановых характеристик.

Общий вид образцов, размещенных на открытом воздухе и под навесом на полигоне климатических испытаний, показан на рис. 1.



а



б



в

Рис. 1. Образцы, размещенные на полигоне климатических испытаний на открытом воздухе (а) и под навесом (б, в)

Для оценки стойкости материалов к климатическому старению определены следующие характеристики: прочность при разрыве, предел текучести, относительное удлинение при разрыве и пределе текучести (ГОСТ 11262–2017), модуль упругости (ГОСТ 9550–81), показатель текучести расплава (ПТР) (ГОСТ 11645–2021) и изменение внешнего вида (фотографирование и исследование с использованием оптического микроскопа). Исследование химических изменений, протекающих в материале под воздействием естественных климатических факторов, выполнено методом ИК-спектроскопии на приборе *Nicolet Protege 460 ESP* (США), снабженном приставкой нарушенного полного внутреннего отражения с алмазной призмой. Спектры зарегистрированы в диапазоне значений $500 \dots 4000 \text{ см}^{-1}$ с разрешением 2 см^{-1} . Число сканирований для получения одного усредненного спектра 32. Обработка спектров проведена в программе OMNIC9. На основании полученных спектров рассчитаны карбо-

нильный (CI) и винильный (VI) индексы, значение которых позволяет оценить глубину протекания окислительно-деструктивных процессов.

Результаты и обсуждение. Внешний вид образцов до экспонирования и после 15 месяцев климатических испытаний приведен на рис. 2.

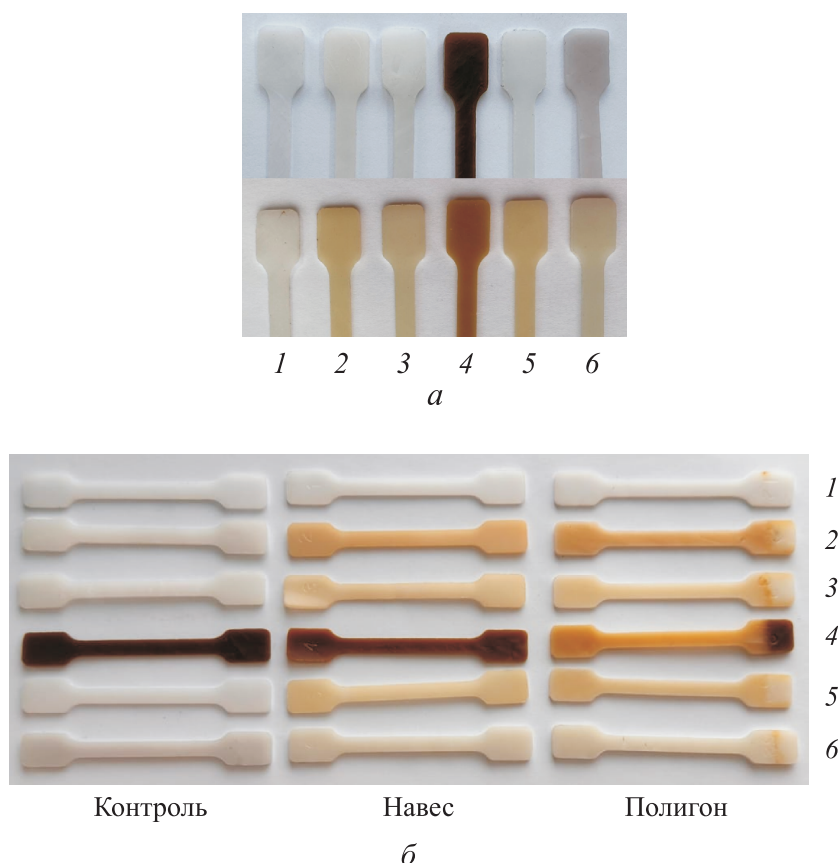
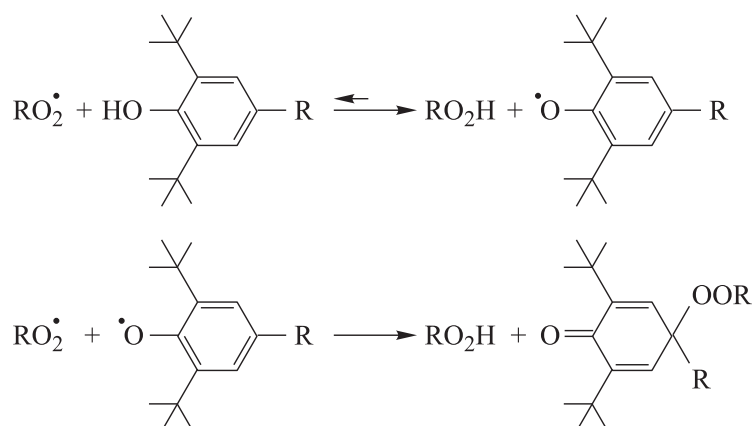


Рис. 2. Внешний вид образцов, содержащих стабилизаторы «Снолен» EP 0.26/51N (1), СО-4 (2), тиол (3), каликсарен (4), СО-3 (5), стафен (6) до экспонирования (а) и после 15 месяцев длительных климатических испытаний (б)

Установлено, что контрольные образцы не изменяют внешний вид при длительном хранении в помещении без доступа света (см. рис. 2, б, контроль). После экспонирования под навесом и на полигоне образцы, содержащие стабилизаторы СО-4, тиол, СО-3, приобретают желто-коричневый оттенок, образцы с каликсареном осветляются, а образцы со стафеном незначительно изменяют оттенок. Образование окрашенных соединений при использовании фенольных стабилизаторов обусловлено образованием хиноидных структур [14, 15] согласно схеме [16]:



Вероятно, насыщенная окраска образцов с каликсареном вызвана тем, что в его структуре изначально содержались окрашенные производные хинона. Осветление этих материалов при экспонировании на полигоне может свидетельствовать об уменьшении концентрации таких групп за счет преобразования в неокрашенную форму. В общем случае повышение интенсивности окрашивания стабилизированных материалов свидетельствует о возрастании числа хиноидных групп при экспонировании.

Результаты анализа исследований деформационно-прочностных характеристик материалов при растяжении показали, что при старении в наиболее широких пределах изменяется относительное удлинение при разрыве, тогда как значения прочности при разрыве, предела текучести и модуля упругости колеблются в рамках погрешности эксперимента. Согласно п. 5.2 технических требований ГОСТ 18599–2001, относительное удлинение при разрыве для напорных труб должно составлять не менее 250 %. Общее число образцов при исследовании физико-механических характеристик при растяжении 5 шт. (согласно ГОСТ 11262–2017). Соотношение числа образцов, удлинение при разрыве которых превышает 250 %, к общему числу испытанных образцов в зависимости от условий продолжительности экспонирования и типа стабилизатора приведено в табл. 1.

Только один из пяти (1/5) образцов, изготовленных из нестабилизированного материала, имеет удлинение при разрыве более 250 % (см. табл. 1, до экспонирования). В свою очередь стабилизированные материалы имеют относительно стабильные показатели удлинения. Согласно полученным результатам, при вальцевании силы трения, приводящие к повышению температуры расплава, и прямой контакт с воздухом окружающей среды

приводят к протеканию в материале без стабилизатора окислительно-деструктивных процессов на стадии их переработки. Стабильность деформационных свойств стабилизированных материалов свидетельствует о том, что применяемые добавки, кроме повышения климатической стойкости, имеют термостабилизирующие свойства, препятствуя протеканию окислительных реакций при высокой температуре. Следует отметить, что относительное удлинение при разрыве материалов со стабилизаторами зачастую превышало 500...600 %, тогда как материал без стабилизатора демонстрировал удлинение в диапазоне 100...300 %, т. е. добавки выполняют функцию пластификатора.

Таблица 1

Соотношение числа образцов, удлинение при разрыве которых превышает 250 %, к общему числу испытанных образцов в зависимости от условий и продолжительности экспонирования

Продолжительность экспонирования, мес.	«Снолен» EP 0.26/51N	CO-4	Тиол	Каликсарен	CO-3	Стафен
<i>Контроль</i>						
0	1/5	5/5	3/5	5/5	5/5	3/5
1	1/5	5/5	3/5	5/5	4/5	4/5
3	0/5	5/5	4/5	5/5	3/5	3/5
6	1/5	4/5	3/5	5/5	5/5	2/5
9	5/5	4/5	3/5	3/5	4/5	4/5
12	1/5	5/5	3/5	5/5	5/5	4/5
15	1/5	4/5	5/5	4/5	4/5	4/5
Итого	10/35	32/35	24/35	32/35	30/35	24/35
<i>Полигон</i>						
0	1/5	5/5	3/5	5/5	5/5	3/5
1	1/5	4/5	2/5	3/5	3/5	1/5
3	3/5	5/5	4/5	3/5	5/5	3/5
6	1/5	4/5	3/5	5/5	4/5	4/5
9	1/5	5/5	4/5	3/5	5/5	3/5
12	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
15	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5	0/5
Итого	7/35	23/35	16/35	19/35	21/35	14/35

Продолжительность экспонирования, мес.	«Снолен» EP 0.26/51N	СО-4	Тиол	Каликсарен	СО-3	Стафен
<i>Навес</i>						
0	1/5	5/5	3/5	5/5	5/5	3/5
1	2/5	5/5	3/5	5/5	4/5	5/5
3	2/5	2/5	4/5	3/5	4/5	1/5
6	1/5	4/5	2/5	3/5	3/5	5/5
9	2/5	5/5	5/5	3/5	4/5	5/5
12	3/5	5/5	5/5	4/5	5/5	4/5
15	1/5	5/5	4/5	3/5	5/5	3/5
Итого	12/35	31/35	26/35	26/35	30/35	26/35
Примечания. 1. Для СО-4, тиола, каликсарена, СО-3, стафена массовое содержание +1 % (масс.). 2. Цветовая гамма отражает соотношение числа образцов, удлинение при разрыве которых превышало 250 %, к общему числу испытанных образцов:						
						

После натурального экспонирования материалов на полигоне (см. табл. 1) по общему числу образцов, продемонстрировавших удовлетворительный уровень удлинения при разрыве, статистически лучшей длительной климатической стойкостью характеризуются материалы со стабилизаторами СО-3, СО-4 и каликсареном: 23, 21 и 19 образцов из 35 испытанных соответственно. Менее половины образцов, изготовленных из материалов без стабилизатора и содержащих стабилизаторы тиол и стафен сохранили деформационные свойства на допустимом уровне при экспонировании в условиях открытого полигона. Деформационные свойства образцов, экспонирование которых осуществлялось под навесом, за исключением ПЭНД с каликсареном, остаются на уровне контрольных материалов. Удлинение менее 250 % продемонстрировали все испытанные материалы в период с 9 до 12 месяцев натурального экспонирования (см. табл. 1).

При старении в полимерном материале протекают конкурирующие реакции деструкции и сшивания макромолекулярных цепей [17]. Протекание процессов значительно влияет на реологические свойства полимерного материала. Так, при межмолекулярном сшивании вязкость расплава повышается, а при уменьшении молекулярной массы — снижается. Для оценки вязкости расплава стабилизированных материалов до и по-

сле длительных и ускоренных климатических испытаний проведено исследование ПТР, результаты которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Изменения ПТР при экспонировании в различных условиях

Продолжительность экспонирования, мес.	«Снолен» EP 0.26/51N	СО-3	Стафен	Тиол	СО-4	Каликсарен
<i>Контроль</i>						
0	0,419	0,448	0,377	0,367	0,336	0,293
1	0,445	0,459	0,388	0,358	0,347	0,312
3	0,404	0,424	0,388	0,374	0,351	0,27
6	0,442	0,424	0,391	0,359	0,349	0,286
9	0,414	0,417	0,409	0,358	0,341	0,314
12	0,436	0,407	0,410	0,333	0,334	0,308
15	0,346	0,462	0,442	0,394	0,365	0,324
<i>Навес</i>						
0	0,419	0,448	0,377	0,367	0,336	0,293
1	0,442	0,453	0,406	0,355	0,354	0,314
3	0,438	0,391	0,472	0,38	0,375	0,311
6	0,394	0,373	0,442	0,352	0,348	0,268
9	0,444	0,319	0,438	0,31	0,342	0,265
12	0,428	0,396	0,466	0,282	0,313	0,268
15	0,415	0,342	0,431	0,283	0,277	0,251
<i>Полигон</i>						
0	0,419	0,448	0,337	0,367	0,336	0,293
1	0,296	0,34	0,209	0,251	0,286	0,088
3	0,267	0,25	0,217	0,244	0,308	0,129
6	0,199	0,296	0,177	0,257	0,232	0,138
9	0,414	0,338	0,222	0,221	0,264	0,086
12	1,604	0,275	0,252	0,244	0,33	0,064
15	2,433	1,236	0,993	0,487	0,345	0,105

Установлено, что введение стабилизирующих добавок на этапе изготовления оказывает влияние на ПТР ПЭНД (см. табл. 2, условия: контроль до экспонирования). Например, ПТР образца с каликсареном на 30...35 % ниже ПТР нестабилизированного ПЭНД. Полученный результат свидетельствует о том, что при термообработке в процессе изготовления в мате-

риале происходят процессы термоокисления, сопровождающиеся образованием межмолекулярных мостиковых связей, которые формируют пространственно-сшитую структуру. При дальнейшем хранении в помещении ПТР стабилизированных материалов не меняется (см. табл. 2, контроль), поэтому на протекание процесса сшивания влияет именно стабилизирующая добавка, которая при прерывании радикальных цепных реакций при повышенной температуре способствует образованию межмолекулярных связей. Экспонирование под навесом (см. табл. 2), препятствующим попаданию прямого солнечного излучения на образцы, практически не оказывает влияние на ПТР исследуемых материалов, лишь к 15 месяцам экспонирования наблюдается тенденция к снижению показателя.

Экспонирование на полигоне климатических испытаний в течение 6–9 месяцев приводит к постепенному снижению ПТР как исходного ПЭНД, так и стабилизированных материалов на его основе (см. табл. 2, полигон). В период 9–15 месяцев климатических испытаний на открытом воздухе ПТР начинает возрастать, за исключением ПТР образцов с каликсареном. Это связано с тем, что в период 1–9 месяцев натурных испытаний процессы сшивания макромолекулярных цепей ПЭНД преобладают над деструкцией, что вызывает снижение ПТР (повышение вязкости расплава), а экспонирование более девяти месяцев приводит к тому, что процессы деструкции начинают преобладать, вызывая снижение молекулярной массы полимера и его вязкости (увеличение ПТР). При этом наиболее интенсивно этот процесс протекает в нестабилизированном ПЭНД, а наиболее стабильными реологическими свойствами при натурном экспонировании обладает образец, содержащий СО-4.

При старении наблюдалось изменение окраски образцов, поэтому для оценки состояния поверхности после климатических испытаний с использованием оптического микроскопа проведены исследования тонких поперечных срезов состаренных материалов. Результаты исследования представлены на рис. 3.

Визуальное изучение характеристик старения не во всех рассмотренных случаях достаточно информативно. В общем случае (см. рис. 3) характер изменения окраски и появления следов охрупчивания на образцах определяется составом материала и продолжительностью воздействия. Визуально хрупкое разрушение выявлено только для материала без стабилизатора после 15 месяцев натурального экспонирования (рис. 3, а'). Изменение окраски установлено на лицевой и теневой сторонах образца. Толщина изменившего окраску слоя с лицевой стороны составляет примерно 0,40...0,45 мм независимо от продолжительности экспонирования (рис. 3, б, б', г, д'). С теневой

стороны изменение окраски проявляется только после длительного экспонирования при толщине не более 0,14...015 мм (см. рис. 3, б', в', з', д'). Изменение окраски теневой стороны образца, на которую не попадало солнечное излучение, обусловлено тем, что в зимний период отражение солнечного излучения от снежного покрова (согласно данным [18] до 80 % излучения может отражаться от чистого снега) приводит к облучению всей поверхности экспонируемых образцов. Полученный результат подтверждается тем, что изменение окраски теневой стороны проявляется после не менее чем шести месяцев натурального экспонирования, т. е. после формирования устойчивого снежного покрова. Этим эффектом можно объяснить и изменение окраски образцов, экспонирование которых осуществлялось под навесом (см. рис. 2).

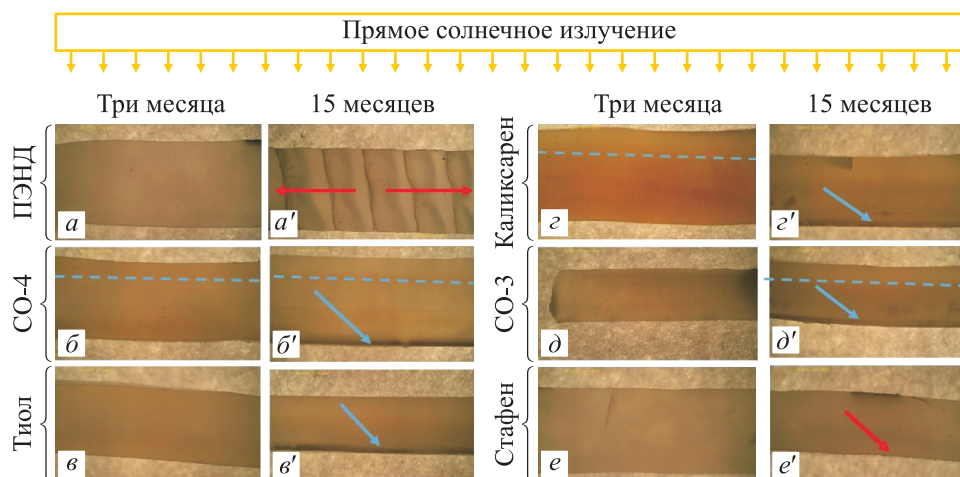


Рис. 3. Поперечные срезы образцов после длительных климатических испытаний (—→, --- — изменение окраски; —→ — следы охрупчивания образцов)

Одним из методов, нашедших широкое применение при исследовании химических превращений в полимерном материале, протекающих под воздействием разнообразных внешних факторов, является ИК-спектроскопия [19, 20]. ИК-спектры ПЭНД марки «Снолен» EP 0.26/51N после экспонирования на полигоне показаны на рис. 4.

Спектр полиэтилена представлен основными пиками, приходящимися на 2917, 2850, 1472, 1462, 1368, 730 и 720 см^{-1} . Эти пики относятся к различным модам колебаний метиленовых групп ($-\text{CH}_2-$): асимметричным и симметричным валентным колебаниям (2917, 2850 см^{-1}); асимметричным и симметричным деформационным ножничным колебаниям

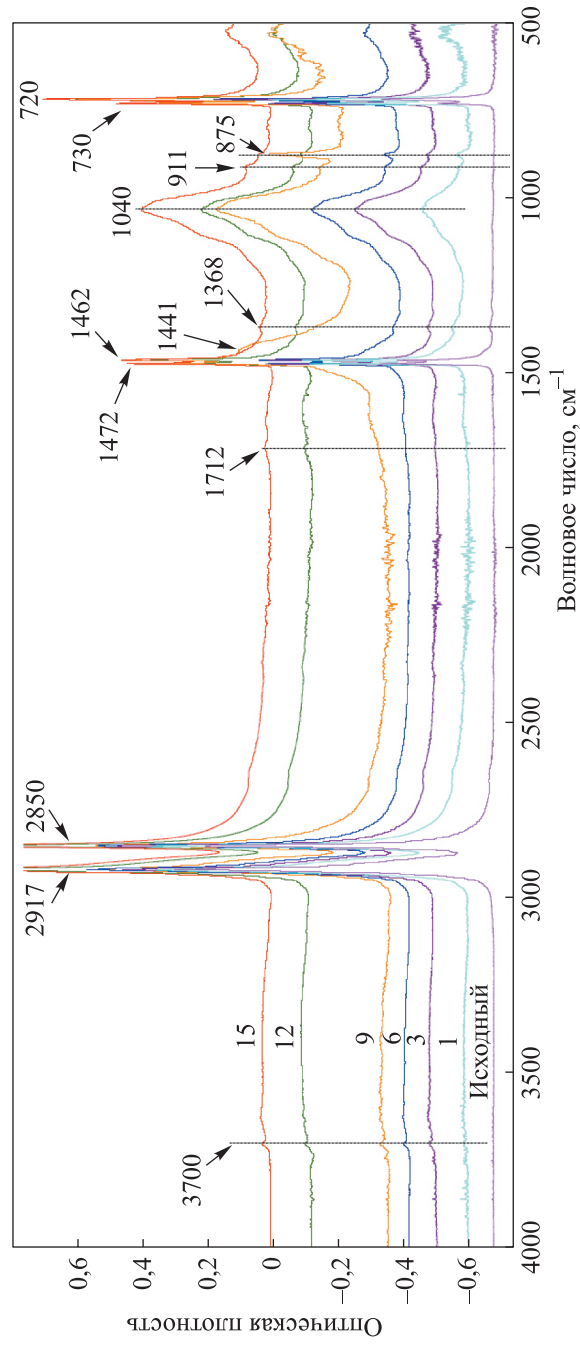
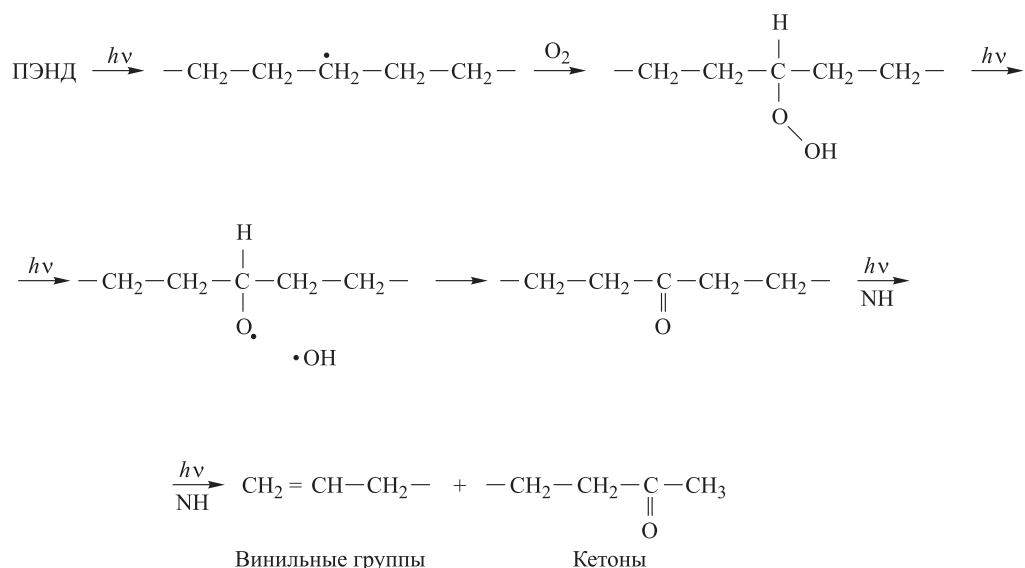


Рис. 4. ИК-спектры ПЭНД марки «Снолен» EP 0.26/51N в зависимости от продолжительности экспонирования на полигоне климатических испытаний

(1472, 1462 см^{-1}); деформационным маятниковым колебаниям (730, 720 см^{-1}); пик при 1368 см^{-1} относится к веерным деформационным колебаниям. Кроме основных пиков, на спектрах образцов после экспонирования на полигоне появляются дополнительные полосы поглощения при 3700, 1712, 1441, 1040, 911 и 875 см^{-1} . При натурном экспонировании на поверхности образцов накапливаются загрязняющие вещества. В условиях Якутска образцы загрязнялись за счет мелкодисперсной пыли, состоящей преимущественно из взвешенных в воздухе минеральных частиц, образующихся при износе и разрушении автодорожных покрытий и грунтовых дорог. Наличие инородных веществ на поверхности испытываемых образцов проявляется в виде полос поглощения при 3700, 1441, 1040 и 875 см^{-1} . Одно из веществ на поверхности образца — калцит, наличие которого обнаруживается проявлением пиков в областях 1441 и 875 см^{-1} . Широкий пик при 1040 см^{-1} относится к колебаниям Si–O в алюмосиликатном каркасе бентонита [21]. Пик 3700 см^{-1} относится к колебаниям O–H в гидроксильной группе в составе алюмосиликатов.

Пики при 1712 и 911 см^{-1} являются проявлениями карбонильных и концевых винильных групп, которые появляются в результате радикальной окислительной деструкции полиэтилена по схеме [22]:



Для количественной оценки степени протекания окислительной радикальной деструкции ПЭНД и стабилизированных материалов на его основе рассчитаны карбонильные и винильные индексы [23–31]. По-

скольку некоторые характеристические полосы поглощения, образовавшиеся при старении ПЭНД, перекрыты полосами поглощения минеральных составляющих пыли, нормализация пиков карбонильной (1712 см^{-1}) и винильной (911 см^{-1}) групп проведена относительно пика поглощения при 1472 см^{-1} , относящегося к валентным колебаниям метиленовых групп ($-\text{CH}_2-$) в полиэтилене [30]. Вычисления выполнены по формулам $CI = I_{1712} / I_{1472}$; $VI = I_{911} / I_{1472}$, где I_{1712}, I_{911} — интенсивность пиков (оптическое поглощение) карбонильной и винильной групп.

При оптическом исследовании тонких срезов (см. рис. 4) изменения были зафиксированы на обеих сторонах экспонируемых образцов, ИК-спектроскопические исследования и расчет винильного и карбонильного индексов проводили как для лицевой, так и для теневой стороны образца. Результаты вычисления карбонильного индекса приведены в табл. 3.

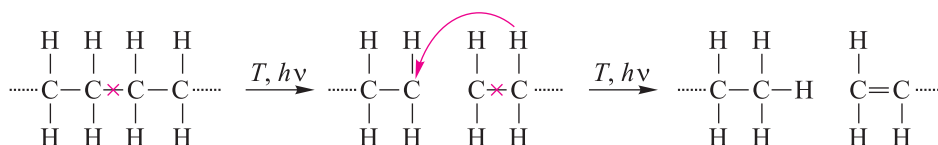
Таблица 3

**Карбонильный индекс стабилизированных материалов на основе ПЭНД
в зависимости от продолжительности экспонирования**

Продолжительность экспонирования, мес.	«Снолен» EP 0.26/51N	СО-4	Тиол	Каликсарен	СО-3	Стафен
<i>Лицевая сторона</i>						
0	0	0,0125	0,0107	0	0,0003	0,0086
1	0,0084	0,0199	0,0089	0,0211	0,0246	0,0142
3	0,0064	0,0220	0,0313	0,0314	0,0279	0,0299
6	0,0075	0,0258	0,0286	0,0291	0,0244	0,0280
9	0,0037	0,0182	0,0197	0,0203	0,0127	0,0189
12	0,0495	0,0563	0,0231	0,0535	0,0612	0,0513
15	0,0396	0,0449	0,0503	0,0513	0,0532	0,0621
<i>Теневая сторона</i>						
0	0	0,0125	0,0107	0	0,0003	0,0086
1	0,0165	0,0352	0,0218	0,0149	0,0190	0,0165
3	0,0090	0,0236	0,0201	0,0132	0,0217	0,0247
6	0,0192	0,0462	0,0440	0,0354	0,0567	0,0385
9	0,0190	0,0565	0,0571	0,0656	0,0440	0,0580
12	0,0512	0,0514	0,0510	0,0552	0,0615	0,0542
15	0,0573	0,0673	0,0662	0,0476	0,0608	0,0542

Установлено, что общее число карбонильных групп на поверхности нестабилизированного ПЭНД значительно ниже, чем в ПЭНД со стабилизирующими добавками. Видно (см. табл. 3), что накопление карбонильных групп происходит на лицевой и теневой сторонах образца. Повышение концентрации карбонильных групп в период 6–9 месяцев экспонирования на теневой стороне образца протекает интенсивнее. Это вызвано тем, что лицевая сторона покрыта сначала слоем пыли, а затем снега, а теневая — продолжает облучаться при переотражении солнечного излучения от снежного покрова. Отметим, что после 12 месяцев экспонирования (весенне-летний период) все исследованные материалы охрупчиваются. Очевидно, что именно экранирование материалов защитным слоем снега предотвращало протекание радикальных цепных реакций в период 3–9 месяцев испытаний. В общем случае период относительной стабильности карбонильного индекса хорошо согласуется с результатами исследования деформационных характеристик материалов — повышение карбонильного индекса в 2–3 раза относительно стабильного периода снижает удлинение при разрыве вплоть до охрупчивания.

Установлено, что общее число карбонильных групп на поверхности нестабилизированного ПЭНД значительно ниже, чем в образцах, содержащих стабилизирующие добавки. Причиной того, что окисленных групп на поверхности нестабилизированного ПЭНД меньше, является то, что в отсутствие стабилизатора в ПЭНД в большей степени протекают реакции диспропорционирования, сопровождающиеся изменением макромолекулярных характеристик ПЭНД, что достаточно хорошо согласуется с результатами определения ПТР. Схема реакции образования концевых винильных групп при диспропорционировании:



Результаты расчета винильного индекса в зависимости от продолжительности экспонирования приведены в табл. 4.

Характер накопления винильных групп на лицевой стороне образцов сходен с характером накопления карбонильных групп. В период 1–9 месяцев (см. табл. 4) концентрация винильных групп в нестабилизированном ПЭНД выше, чем в образцах со стабилизирующими добавками. Это косвенно подтверждает вероятность протекания процессов деградации нестабилизированного ПЭНД по механизму реакций диспропорционирования,

инициирующихся солнечным излучением, одним из вариантов обрыва цепи которых является образование концевых винильных групп. Число винильных групп на теневой стороне значительно ниже, чем на лицевой, что может определяться меньшей интенсивностью рассеянного солнечного излучения, попадающего на образцы при отражении от окружающих поверхностей.

Таблица 4

**Винильный индекс стабилизированных материалов на основе ПЭНД
в зависимости от продолжительности экспонирования**

Продолжительность экспонирования, мес.	«Снолен» EP 0.26/51N	СО-4	Тиол	Каликсарен	СО-3	Стафен
<i>Лицевая сторона</i>						
0	0,0013	0,0008	0,0002	0	0,0010	0,0005
1	0,0252	0,0132	0,0134	0,0158	0,0041	0,0190
3	0,0256	0,0165	0,0156	0,0179	0,0112	0,0149
6	0,0151	0,0186	0,0143	0,0189	0,0146	0,0131
9	0,0296	0,0164	0,0211	0,0270	0,0063	0,0220
12	0,0396	0,0493	0,0405	0,0321	0,0408	0,0427
15	0,0396	0,0449	0,0377	0,0513	0,0426	0,0414
<i>Теневая сторона</i>						
0	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
1	0,0103	0	0,0018	0,0059	0,0057	0,0062
3	0,0081	0,0058	0,0058	0,0112	0,0069	0,0015
6	0,0096	0,0108	0,0088	0,0044	0,0036	0,0082
9	0,0044	0,0032	0,0104	0,0098	0,0013	0,0043
12	0,0079	0,0097	0,0144	0,0072	0,0036	0,0090
15	0,0183	0,0077	0,0110	0,0060	0,0039	0,0151

Заклучение. Показано, что при отсутствии стабилизирующих добавок радикальная деструкция ПЭНД сопровождается реакцией диспропорционирования, окислительные процессы с участием кислорода воздуха протекают в меньшей степени, чем в стабилизированных материалах. Тем не менее при введении в полимер стабилизаторы выполняют тройную функцию — как климатические стабилизаторы, термостабилизаторы и пластификаторы. По совокупности полученных результатов наиболее перспективно применение серосодержащих гибридных стабилизаторов

СО-3 и СО-4, которые и ранее в составе промышленных марок полиэтиленов, содержащих специфический набор функциональных добавок, показали высокую эффективность [30, 31].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Горбунов Ф.К., Полубояров В.А., Бердникова Л.К. и др. Влияние УФ-излучения на механические свойства полиуретановых композитов. *4-й Междисциплинар. науч. форум с междунар. уч. «Новые материалы и перспективные технологии»*. Т. 2. М., Буки Веди, 2018, с. 350–351. EDN: MHPYV
- [2] Мясенко Д.М. Влияние термического, радиационно-химического и фотометрического воздействия на деструкцию и «старение» полимерных материалов. В кн.: *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством*. Т. 1. М., ВНИМИ, 2020, с. 406–411. DOI: <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-406-411>
- [3] Павлов М.Р., Николаев Е.В., Андреева Н.П. и др. К вопросу о методике оценки стойкости полимерных материалов к воздействию солнечного излучения (обзор). *Труды ВИАМ*, 2016, т. 43, № 7, с. 96–110. DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-7-11-11>
- [4] Wypych G. Handbook UV degradation and stabilization. ChemTec, 2020.
- [5] Yousif E., Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. *SpringerPlus*, 2013, vol. 2, art. 398. DOI: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>
- [6] Алиев А.А., Леднева О.А., Попов А.А. Изменения электрофизических свойств полимерных смесей под действием электрических разрядов. *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2010, т. 52, № 3, с. 441–445. EDN: LOJZUP
- [7] Тертышная Ю.В., Подзорова М.В., Монахова Т.В. и др. Твердофазное термоокисление полиэтилена в смеси с полилактидом. *Химическая физика*, 2019, т. 38, № 3, с. 80–87. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0207401X19030105>
- [8] Баталин Б.С. Красновских М.П. Долговечность и термическая устойчивость пенополистирола. *Строительные материалы*, 2014, № 8, с. 64–67. EDN: SJVXPN
- [9] Kushwaha O.S., Avadhani C.V., Singh R.P. Effect of UV rays on degradation and stability of high performance polymer membranes. *Adv. Mater. Lett.*, 2014, vol. 5, no. 5, pp. 272–279. DOI: <https://doi.org/10.5185/amlett.2014.10533>
- [10] Sørensen L., Groven A.S., Hovsbakken I.A., et al. UV degradation of natural and synthetic microfibers causes fragmentation and release of polymer degradation products and chemical additives. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 755, part 2, art. 143170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143170>
- [11] Выдрина Т.С., Бурындин В.Г., Шкодич В.Ф. и др. Исследование трубных марок полиэтилена для производства высококачественных металлопластовых труб. *Вестник Казанского технологического университета*, 2014, № 17, с. 100–102. EDN: SXYEOV

- [12] Mankar V.H. Chhavi sterically hindered phenols as antioxidant. *Eur. J. Mol. Clin. Med.*, 2020, vol. 7, no. 7, pp. 3481–3491.
- [13] Колчина Г.Ю., Тухватуллин Р.Ф., Бабаев Э.Р. и др. Пространственно-затрудненные фенолы как антиокислительные, антикоррозионные и антимикробные присадки к минеральным смазочным маслам. *Нефтегазохимия*, 2017, № 1, с. 10–13. EDN: YSRFFZ
- [14] Федоров А.Л., Петухова Е.С., Аргунова А.Г. Изучение влияния УФ-излучения на структуру стабилизатора СО-4 методом ИК-спектроскопии. *Сб. тр. Всеросс. конф. «КЛИМАТ–2022»*. М., ВИАМ, 2022, с. 109–118.
- [15] Терах Е.И., Просенко А.Е., Никулина В.В. и др. Исследование синергических эффектов антиоксиданта СО-3 и его структурных аналогов в сравнении с композициями триалкилфенолов и диалкилсульфида. *Журнал прикладной химии*, 2003, т. 76, № 2, с. 261–265. EDN: NOBUZE
- [16] Gijsman P. Polymer stabilization. In: *Applied Plastics Engineering Handbook*. William Andrew, 2011, pp. 375–399.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10021-2>
- [17] Kim K.-W., Lee H., An J.-H., et al. Effects of cross-linking methods for polyethylene-based carbon fibers: review. *Carbon Lett.*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 147–170.
DOI: <https://doi.org/10.5714/CL.2015.16.3.147>
- [18] Рафаилович А.С. Объекты исследования и параметры исследовательской аппаратуры для ультрафиолетовой области спектра. *Гео-Сибирь*, 2005, т. 6, с. 52–58. EDN: PUJAVJ
- [19] Gardette M., Perthue A., Gardette J.L., et al. Photo- and thermal-oxidation of polyethylene: Comparison of mechanisms and influence of unsaturation content. *Polym. Degrad. Stab.*, 2013, vol. 98, iss. 11, pp. 2383–2390.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.07.017>
- [20] Benítez A., Sánchez J.J., Arnal M.L., et al. Abiotic degradation of LDPE and LLDPE formulated with a pro-oxidant additive. *Polym. Degrad. Stab.*, 2013, vol. 98, pp. 490–501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.12.011>
- [21] Masindi V., Gitari M.W., Tutu H., et al. Efficiency of ball milled South African bentonite clay for remediation of acid mine drainage. *J. Water Process Eng.*, 2015, vol. 8, pp. 227–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.11.001>
- [22] Antunes M.C., Agnelli J.A.M., Babetto A.S., et al. Abiotic thermo-oxidative degradation of high density polyethylene: effect of manganese stearate concentration. *Polym. Degrad. Stab.*, 2017, vol. 143, pp. 95–103.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.06.012>
- [23] Ali S.S., Qazi I.A., Arshad M., et al. Photocatalytic degradation of low density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, 2016, vol. 5, pp. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.001>
- [24] Yeh C.L., Nikolić M.A.L., Gomes B., et al. The effect of common agrichemicals on the environmental stability of polyethylene films. *Polym. Degrad. Stab.*, 2015, vol. 120, pp. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.06.007>

- [25] Maalihan R.D., Pajarito B.B. Effect of colorant, thickness, and pro-oxidant loading on degradation of low-density polyethylene films during thermal aging. *J. Plast. Film Sheeting*, 2016, vol. 32, no. 2, pp. 124–139. DOI: <https://doi.org/10.1177/8756087915590276>
- [26] Elanmugilan M., Sreekumar P., Singha N., et al. Natural weather aging of low density polyethylene: effect of prodegradant additive. *Plast. Rubber Compos.*, 2014, vol. 43, pp. 347–353. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743289814Y.0000000104>
- [27] Gulmine J.V., Janissek P.R., Heise H.M., et al. Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering. *Polym. Degrad. Stab.*, 2003, vol. 79, no. 3, pp. 385–397. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00338-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00338-5)
- [28] Jakubowicz I., Enebro J. Effects of reprocessing of oxobiodegradable and non-degradable polyethylene on the durability of recycled materials. *Polym. Degrad. Stab.*, 2012, vol. 97, pp. 316–321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.12.011>
- [29] Roy P.K., Surekha P., Rajagopal C., et al. Effect of benzil and cobalt stearate on the aging of low-density polyethylene films. *Polym. Degrad. Stab.*, 2005, vol. 90, no. 3, pp. 577–585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.01.017>
- [30] Федоров А.Л., Петухова Е.С., Аргунова А.Г. Оценка эффективности стабилизаторов для полиэтилена. *Сб. мат. и докл. Всерос. конф. «Целостность и ресурс в экстремальных условиях»*. Киров, МЦИТО, 2024, с. 253–256. DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-37269-2024-1-253-256>
- [31] Соколова М.Д., Петрова П.Н., Федорова А.Ф. и др. Исследование климатической стойкости полимерных материалов арктического назначения, стабилизированных синтезированными в НИОХ СО РАН соединениями. *Сб. тез. науч.-практ. конф. «Малотоннажная химия: Разработки, производство, аналитический контроль»*. Новосибирск, НИОХ СО РАН, 2024, с. 38. EDN: QXKNRC

Федоров Андрей Леонидович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории материаловедения ИПНГ СО РАН ФИЦ ЯНЦ СО РАН (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20).

Петухова Евгения Спартаковна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории материаловедения ИПНГ СО РАН ФИЦ ЯНЦ СО РАН (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20).

Аргунова Анастасия Гавриловна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории материаловедения ИПНГ СО РАН ФИЦ ЯНЦ СО РАН (Российская Федерация, 677000, Якутск, ул. Автодорожная, д. 20).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Федоров А.Л., Петухова Е.С., Аргунова А.Г. Длительные климатические испытания полиэтилена низкого давления в условиях очень холодного климата. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2026, № 1 (124), с. 133–157. EDN: WWKQWW

LONG-TERM CLIMATIC TESTS OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE IN VERY COLD CLIMATE CONDITIONS

A.L. Fedorov

E.S. Petukhova

A.G. Argunova

gelvirb@mail.ru

evgspar@rambler.ru

ag_argunova@mail.ru

IPNG SB RAS FRC YaSC SB RAS, Yakutsk, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of a study of the climatic resistance of high-density polyethylene containing stabilizing additives of various grades, which was exposed to very cold climate conditions (the territory of the urban district of Yakutsk, the Republic of Sakha (Yakutia)). The results of the study of physical and mechanical characteristics showed that oxidative destruction of high-density polyethylene begins already during the manufacturing of prototypes, which is reflected in the value of the relative elongation at break of the original high-density polyethylene after rolling. Since the introduction of stabilizing additives has a positive effect on the deformation characteristics of high-density polyethylene, it has been shown that the additives used in the work perform the function of thermal stabilization and plasticization. The results of the study of the melt flow index showed that at the initial stage of exposure (up to 6 months), predominantly intermolecular crosslinking reactions occur in the materials; an increase in the duration of the tests leads to the predominance of polymer chain rupture reactions over crosslinking reactions, as evidenced by a sharp decrease in melt viscosity. IR spectroscopic studies have shown that the introduction of stabilizers leads to a change in the mechanisms of processes occurring during aging. Climatic aging of high-density polyethylene without stabilizers is characterized by the predominant occurrence of disproportionation reactions, accompanied by the accumulation of vinyl groups, while materials with stabilizers exhibit a tendency to accumulate carbonyl groups. Based on the totality of the research results, the best resistance to the impact of climatic factors in very cold climates, characterized by extremely low temperatures in winter

Keywords

High-density polyethylene, climatic tests, physical and mechanical characteristics, melt flow index, IR spectroscopy

and high levels of solar insolation in summer, is demonstrated by materials containing hybrid bifunctional stabilizers of the CO-3 and CO-4 brands

Received 31.03.2025

Accepted 25.04.2025

© Author(s), 2026

The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (reg. no. 122011100162-9) using the scientific equipment of the Center for Collective Use of the FRC YaSC SB RAS

REFERENCES

- [1] Gorbunov F.K., Poluboyarov V.A., Berdnikova L.K., et al. [The influence of UV radiation on the mechanical properties of polyurethane composites]. *Chetvertyy mezhdistsipl. nauch. forum s mezhdunar. uchastiem. "Novye materialy i perspektivnye tekhnologii". T. 2* [4th Interdisciplinary Sci. Forum with Int. Participation New Materials and Advanced Technologies. Vol. 2]. Moscow, Buki Vedi Publ., 2018, pp. 350–351 (in Russ.). EDN: MIHPYV
- [2] Myalenko D.M. Vliyanie termicheskogo, radiatsionno-khimicheskogo i fotometri-cheskogo vozdeystviya na destruktsiyu i "starenie" polimernykh materialov [The effect of thermal, radiation-chemical and photometric impact on destruction and "ageing" of polymeric materials]. *Aktualnye voprosy molochnoy promyshlennosti, mezhotraslevye tekhnologii i sistemy upravleniya kachestvom* [In: Current issues in the dairy industry, inter-industry technologies and quality management systems]. Vol. 1. Moscow, VNIMI, 2020, pp. 406–411 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-406-411>
- [3] Pavlov M.R., Nikolaev E.V., Andreeva N.P., et al. To the question of methodology for testing of polymer materials on resistance to solar radiations effect (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, vol. 43, no. 7, pp. 96–110 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-7-11-11>
- [4] Wypych G. Handbook UV degradation and stabilization. ChemTec, 2020.
- [5] Yousif E., Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. *SpringerPlus*, 2013, vol. 2, art. 398.
DOI: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-398>
- [6] Aliev A.A., Ledneva O.A., Popov A.A. The effect of electric discharges on electro-physical properties of polymer blends. *Polym. Sci. Ser. A*, 2010, vol. 52, no. 3, pp. 295–298. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965545X10030119>
- [7] Tertyshnaya Yu.V., Podzorova M.V., Monakhova T.V., et al. Solid-phase thermal oxidation of polyethylene—polylactide blends. *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 354–361. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990793119020106>
- [8] Batalin B.S. Krasnovskikh M.P. Durability and thermal stability of expanded polystyrene. *Stroitelnye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 8, pp. 64–67 (in Russ.). EDN: SJVXPN

- [9] Kushwaha O.S., Avadhani C.V., Singh R.P. Effect of UV rays on degradation and stability of high performance polymer membranes. *Adv. Mater. Lett.*, 2014, vol. 5, no. 5, pp. 272–279. DOI: <https://doi.org/10.5185/amlett.2014.10533>
- [10] Sørensen L., Groven A.S., Hovsbakken I.A., et al. UV degradation of natural and synthetic microfibers causes fragmentation and release of polymer degradation products and chemical additives. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 755, part 2, art. 143170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143170>
- [11] Vydrina T.S., Buryndin V.G., Shkodich V.F., et al. Research of polyethylene pipe grades for the production of high-quality metal-plastic pipes. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, no. 17, pp. 100–102 (in Russ.). EDN: SXYEOV
- [12] Mankar V.H. Chhavi sterically hindered phenols as antioxidant. *Eur. J. Mol. Clin. Med.*, 2020, vol. 7, no. 7, pp. 3481–3491.
- [13] Kolchina G.Yu., Tukhvatullin R.F., Babaev E.R., et al. Sterically hindered phenols as antioxidant, anticorrosion and antimicrobial additives to mineral lubricating oils. *Neftegazokhimiya* [Oil and Gas Chemistry], 2017, no. 1, c. 10–13 (in Russ.). EDN: YSRFFZ
- [14] Fedorov A.L., Petukhova E.S., Argunova A.G. [Study of the influence of UV radiation on the structure of co-4 stabilizer by IR spectroscopy]. *Sb. tr. Vseross. konf. "KLIMAT-2022"* [Proc. Russ. Conf. KLIMAT-2022]. Moscow, VIAM Publ., 2022, pp. 109–118 (in Russ.).
- [15] Terakh E.I., Prosenko A.E., Nikulina V.V., et al. Synergistic effects in SO-3 antioxidant and its structural analogs, as compared to trialkylphenol-dialkyl sulfide mixtures. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2003, vol. 76, no. 2, pp. 253–257. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1024602729156>
- [16] Gijsman P. Polymer stabilization. In: *Applied Plastics Engineering Handbook*. William Andrew, 2011, pp. 375–399. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10021-2>
- [17] Kim K.-W., Lee H., An J.-H., et al. Effects of cross-linking methods for polyethylene-based carbon fibers: review. *Carbon Lett.*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 147–170. DOI: <https://doi.org/10.5714/CL.2015.16.3.147>
- [18] Rafailovich A.S. Research objects and parameters of research equipment for the ultraviolet region of the spectrum. *Geo-Sibir*, 2005, vol. 6, pp. 52–58 (in Russ.). EDN: PUJAVJ
- [19] Gardette M., Perthue A., Gardette J.L., et al. Photo- and thermal-oxidation of polyethylene: Comparison of mechanisms and influence of unsaturation content. *Polym. Degrad. Stab.*, 2013, vol. 98, iss. 11, pp. 2383–2390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.07.017>
- [20] Benítez A., Sánchez J.J., Arnal M.L., et al. Abiotic degradation of LDPE and LLDPE formulated with a pro-oxidant additive. *Polym. Degrad. Stab.*, 2013, vol. 98, pp. 490–501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.12.011>
- [21] Masindi V., Gitari M.W., Tutu H., et al. Efficiency of ball milled South African bentonite clay for remediation of acid mine drainage. *J. Water Process Eng.*, 2015, vol. 8, pp. 227–240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.11.001>

- [22] Antunes M.C., Agnelli J.A.M., Babetto A.S., et al. Abiotic thermo-oxidative degradation of high density polyethylene: effect of manganese stearate concentration. *Polym. Degrad. Stab.*, 2017, vol. 143, pp. 95–103.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.06.012>
- [23] Ali S.S., Qazi I.A., Arshad M., et al. Photocatalytic degradation of low density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes. *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, 2016, vol. 5, pp. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.001>
- [24] Yeh C.L., Nikolić M.A.L., Gomes B., et al. The effect of common agrichemicals on the environmental stability of polyethylene films. *Polym. Degrad. Stab.*, 2015, vol. 120, pp. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.06.007>
- [25] Maalihan R.D., Pajarito B.B. Effect of colorant, thickness, and pro-oxidant loading on degradation of low-density polyethylene films during thermal aging. *J. Plast. Film Sheeting*, 2016, vol. 32, no. 2, pp. 124–139.
DOI: <https://doi.org/10.1177/8756087915590276>
- [26] Elanmugilan M., Sreekumar P., Singha N., et al. Natural weather aging of low density polyethylene: effect of prodegradant additive. *Plast. Rubber Compos.*, 2014, vol. 43, pp. 347–353. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743289814Y.0000000104>
- [27] Gulmine J.V., Janissek P.R., Heise H.M., et al. Degradation profile of polyethylene after artificial accelerated weathering. *Polym. Degrad. Stab.*, 2003, vol. 79, no. 3, pp. 385–397. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00338-5](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00338-5)
- [28] Jakubowicz I., Enebro J. Effects of reprocessing of oxobiodegradable and non-degradable polyethylene on the durability of recycled materials. *Polym. Degrad. Stab.*, 2012, vol. 97, pp. 316–321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.12.011>
- [29] Roy P.K., Surekha P., Rajagopal C., et al. Effect of benzil and cobalt stearate on the aging of low-density polyethylene films. *Polym. Degrad. Stab.*, 2005, vol. 90, no. 3, pp. 577–585. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.01.017>
- [30] Fedorov A.L., Petukhova E.S., Argunova A.G. [Evaluation of the effectiveness of stabilizers for polyethylene]. *Sb. mater. i dokl. Vseros. konf. "Tselostnost i resurs v ekstremnykh usloviyakh"* [Proc. Russ. Conf. Integrity and Resource in Extreme Conditions]. Kirov, MTsITO Publ., 2024, pp. 253–256 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-37269-2024-1-253-256>
- [31] Sokolova M.D., Petrova P.N., Fedorova A.F., et al. [Study of climatic resistance of polymeric materials for arctic use stabilized by compounds synthesized at the Research Institute of Organic Chemistry SB RAS]. *Sb. tez. nauch.-prakt. konf. "Malotonnazhnaya khimiya: Razrabotki, proizvodstvo, analiticheskiy control"* [Abs. Sci.-Pract. Conf. Small-Tonnage Chemistry: Development, Production, Analytical Control]. Novosibirsk, NIOCH SB RAS Publ., 2024, p. 38 (in Russ.). EDN: QXKNRC

Fedorov A.L. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Materials Science, IPNG SB RAS FRC YaSC SB RAS (Avtodorozhnaya ul. 20, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Petukhova E.S. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Materials Science, IPNG SB RAS FRC YaSC SB RAS (Avtodorozhnaya ul. 20, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Argunova A.G. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Materials Science, IPNG SB RAS FRC YaSC SB RAS (Avtodorozhnaya ul. 20, Yakutsk, 677000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Fedorov A.L., Petukhova E.S., Argunova A.G. Long-term climatic tests of high-density polyethylene in very cold climate conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2026, no. 1 (124), pp. 133–157 (in Russ.).

EDN: WWKQWW