

Information about authors

Alibek Zhumabekovich Mutushev – PhD, Scientific Center for New Technologies, Almaty Technological University; e-mail: alibek_090@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5047-5608>.

Aknur Berdibayevna Seisenova – PhD, Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Almaty, Kazakhstan; e-mail: z_aknura@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8981-307X>.

Omirezak Sembily Kapizov – Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Almaty, Kazakhstan; e-mail: ok-sir@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1979-7625>.

Dauren Kabdrakimovich Mukhanov* – Department of Chemistry and Chemical Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Center for Advanced Science and Technology, Almaty, Kazakhstan; e-mail: dd_511@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1645-8625>.

González-Leal, Juan María – Professor, Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Sciences, University of Cadiz, Puerto Real, Cadiz, Spain; e-mail: juanmaria.gonzalez@uca.es. <https://orcid.org/0000-0003-1077-2197>.

Сведения об авторах

Алибек Жумабекович Мутушев – PhD, Scientific Center for New Technologies, Алматинский технологический университет, Алматы, Казахстан; e-mail: alibek_090@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5047-5608>.

Акнур Бердибаевна Сейсенова – PhD, Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Алматы, Казахстан; e-mail: z_aknura@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8981-307X>.

Омирзак Сембиулы Капизов – Scientific Center for New Technologies, AlAkSan, Алматы, Казахстан; e-mail: ok-sir@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1979-7625>.

Даурен Кабдракимович Муханов* – докторант факультета химии и химической технологии, Казахского национального университета имени аль-Фараби, Center for Advanced Science and Technology, Алматы, Казахстан; e-mail: dd_511@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1645-8625>.

Хуан Мария Гонзалез-лил – Профессор кафедры физики конденсированных сред факультета естественных наук Университета Кадиса, Пуэрто-Реаль, Кадис, Испания; e-mail: juanmaria.gonzalez@uca.es. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1077-2197>.

Авторлар туралы мәліметтер

Алибек Жумабекович Мутушев – PhD, Scientific Center For New Technologies, Алматы технологиялық университеті, Қазақстан; e-mail: alibek_090@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5047-5608>.

Акнур Бердибаевна Сейсенова – PhD, Scientific Center For New Technologies, AlAkSan, Алматы, Қазақстан; e-mail: z_aknura@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8981-307X>.

Өмірзақ Сембіұлы Қапизов – Scientific Center For New Technologies, AlAkSan, Алматы, Қазақстан; e-mail: ok-sir@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1979-7625>.

Даурен Кабдракимович Муханов* – химия және химиялық технология факультетінің, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің докторанты, Center for Advanced Science and Technology, Алматы, Қазақстан; e-mail: dd_511@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1645-8625>.

Хуан Мария Гонзалез-лил – Кадис Университетінің жаратылыстану ғылымдары факультетінің конденсацияланған орта физикасы кафедрасының профессоры, Пуэрто-реал, Кадис, Испания; e-mail: juanmaria.gonzalez@uca.es. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1077-2197>.

Received 23.09.2025

Revised 11.11.2025

Accepted 12.11.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-73](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-73)

MPHTI: 61.61.01



В.Ю. Тюканько, Р.А. Тарунин, В.А. Воропаева, Р.Р. Алпысов*, А.М. Умарова

Северо-Казахстанский Университет имени Манаша Козыбаева,

150000, Казахстан, Петропавловск, ул. Абая, 18

*e-mail: sparkggvpeasy27@gmail.com

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ РОТАЦИОННЫХ КОМПОЗИТОВ В ПРОЦЕССЕ РЕЦИКЛИНГА ПУТЕМ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФОБНОСТИ ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Аннотация: В данной статье представлено исследование, посвященное изучению проблемы повторной утилизации полиэтилена (его вторичной переработки – рециклингу) методом ротационного формования. В научной литературе рециклинг ротационных марок полиэтилена (РПЭ) очень слабо изучен, а представленные данные часто противоречивы. Однако для

производства емкостей, методом ротационного формования, с использованием вторичного полиэтилена в промышленности необходимо учитывать его деградацию (проходящую в условиях рециклинга), для оценки которой авторы использовали методы: ИК-спектроскопию, атомно-силовую микроскопию, изучение гидрофобности поверхности РПЭ (путем замера краевого угла смачивания (КУС)) и механические испытания. Ввиду повсеместного использования данных емкостей (для хранения минерального удобрения, марки КАС28), изучали КУС РПЭ дистиллированной водой (после выдержки в среде КАС28) при различных технологических режимах их переработки (показатель PIAT). Показано, что рециклинг РПЭ приводит к образованию карбоксильных групп на поверхности полиэтилена и значительному росту его гидрофильности (КУС уменьшился до 36%). Выдержка в КАС28 так же увеличивает гидрофильность, изготовленных из вторичного и первичного РПЭ изделий (снижение краевого угла смачивания от 8% до 28%) независимо от рассматриваемых технологических параметров переработки. Показано, что наиболее влияющим фактором (из изученных) на гидрофильность РПЭ является – рециклинг. Установлено, что при дозировке до 15-25% вторичного полиэтилена в композитах наблюдаются лишь незначительные изменения прочностных характеристик (предела прочности и деформации), что позволяет рекомендовать частичное замещение первичного сырья без критических потерь в эксплуатационных свойствах (на вторичный полиэтилен). Это открывает перспективы для экономически целесообразного использования вторичного ПЭ в производстве ротационных композитов. Данное исследование может быть использовано для оценки деградации РПЭ в процессе его рециклинга и улучшения эксплуатационных свойств готовых изделий.

Ключевые слова: ротационное формование, рециклинг, деградация, смачивание, полиэтилен.

Введение

Ротационное формование (РФ) представляет собой уникальный технологический процесс переработки пластмасс для производства разнообразных изделий из полимеров, в основном из полиэтилена. Оно обеспечивает большую универсальность получаемых изделий (начиная от простых контейнеров для хранения сыпучих продуктов и заканчивая сложными конструкциями в автомобилестроении, медицине и аэрокосмической промышленности) [1, 2]. РФ является одним из быстрорастущих направлений переработки пластмасс в Республики Казахстан, однако исследований в области вторичной переработки ротационного полиэтилена (далее РПЭ) «рециклинга», в мире очень мало (в нашей стране не проводилось вовсе). Почти все проведенные исследования в области рециклинга пластмасс изучали такие процессы как: литье под давлением и экструзию пластиков [3]. Родоначальники научного изучения технологии РФ ученые королевского университета Белфаста провели цикл исследований по изучению влияния содержания вторичного полиэтилена на механические свойства ротационных композитов. В работе [4] показано, что введение в ротационные композиты вторичного РПЭ вызывает снижение прочности изделий, однако авторы утверждают, что смешивание первичного и вторичного полиэтилена для РФ может быть эффективным способом дальнейшей переработки пластмасс в условиях экономики замкнутого цикла. В результате изучения источников [5-7] можно сделать вывод о противоречивости результатов изучения рециклинга РПЭ.

Вместе с тем, имеющиеся в Республики Казахстан предприятия в области РФ заинтересованы в исследованиях в области рециклинга ПЭ для производства более дешевых емкостей, с использованием вторичного РПЭ. Для решения данной проблемы авторы статьи провели исследование оценки термодеструкции РПЭ, в процессе рециклинга. В процессе рециклинга РПЭ происходит два дополнительных его нагрева – при перемоле (до температуры 90-100°C) и спекании (до температуры 180-210°C), причем они проходят в кислородсодержащей атмосфере (воздух). Следовательно, возможно образование кислородсодержащих групп на поверхности изделий из РПЭ, поэтому для оценки его термодеструкции использовали методы: ИК-спектроскопию (для выявления кислородсодержащих групп), атомно-силовую микроскопию (для выявления морфологических изменений структуры) и изменение гидрофобности поверхности РПЭ (путем замера краевого угла смачивания (КУС)).

При разработке методики оценки гидрофобности РПЭ авторы столкнулись с эффектом «высокой пористости» изделий, изготовленных методом РФ. Количество пор на поверхности пластиковых изделий, изготовленных ротационным формованием, напрямую зависит от технологических параметров изготовления конкретного изделия [8-9]. При этом наличие

большого числа пор на поверхности изделия может значительно изменить гидрофобно/гидрофильные свойства поверхности полиэтилена. Для количественной оценки гидрофобно/гидрофильных свойств наружной поверхности полиэтиленовых изделий, изготовленных ротационным формованием, используется показатель «краевой угол смачивания (θ)». Краевой угол смачивания определяет способность жидкости растекаться и взаимодействовать с поверхностью твердого тела. Этот параметр часто используется для контроля за поверхностными свойствами материалов. Исследования, проведенные в работах Subedi, D.P. (2011) и Martins CI and Gil V (2020) [10], подтверждают, что краевой угол смачивания может служить надежным показателем для оценки гидрофобно/гидрофильных свойств поверхности материала. Смачиваемость поверхности пластмасс, мерой которой является краевой угол смачивания (θ), определяется как угол между касательной, проведенной к поверхности жидкости через точку соприкосновения трех сред и поверхностью твердого тела, при этом краевой угол смачивания отсчитывается от касательной в сторону жидкой фазы [11, 12].

Более 70% перерабатываемого сырья в ротационном формовании в Республики Казахстан приходится на изготовление емкостей, в основном использующихся для хранения жидких минеральных удобрений, марки КАС-28. Поэтому краевой угол смачивания РПЭ изучали дистиллированной водой (после выдержки в среде КАС-28). В данной работе проведена оценка термодеструкции РПЭ в процессе рециклинга за счет изучения гидрофобно/гидрофильных свойств пластика, оцениваемых по краевому углу смачивания дистиллированной водой поверхности ротационного полиэтилена, ИК-спектроскопией и атомно-силовой микроскопией.

2. Экспериментальная часть

2.1 Материалы

Для исследований использовался первичный и вторичный (прошедший один цикл переработки – rРПЭ) линейный ротационный полиэтилен, марки ELTEX HD3850UA (далее «ELTEX») с плотностью 938 кг/м³ и индексом текучести (MFI) (190°C/2.16 kg) – 0,0044 kg/10 min, изготовитель фирма INEOS (Великобритания). В качестве пигмента использовался VYNAMON GREEN 600734 (PG7) изготовителя Heubach (Германия). Дополнительные пластификаторы, наполнители и модификаторы не применялись. Разделяющим агентом был фторопластовый лак с дисульфидом молибдена MODENGY® 1014 фирмы (MODENGY, Россия).

В качестве жидкого минерального удобрения использовали карбамид-аммиачную смесь, марки КАС-28 (плотность 1,28 кг/м³), изготовитель – «Агросевер» (Россия). Её состав: аммиачная селитра (NH₄NO₃) – 40% (по массе), карбамид ((NH₂)₂CO) – 30% и вода (H₂O) – 30%.

2.2 Методика определения краевого угла смачивания

Краевой угол смачивания (θ) определяли на приборе ACAM (рис. 1) Индийской компании Apex Instruments.



Рисунок 1 – Прибор для определения краевого угла смачивания ACAM

- 1 – модуль дозатора, 2 – источник света, 3 – регулятор интенсивности освещения, 4 – основание,
5 – регулятор поднятия столика, 6 – камера, 7 – столик с подложкой, 8 – главный контролер,
9 – системы настройки иглы по горизонтали и вертикали, 10 – двигатель модуля дозатора

Расчет краевого угла смачивания проводили в программе Apex Acam Software Virsion 2.026.088.1, поставляемой к прибору ACAM. В исследованиях использовали эллиптический метод расчета краевого угла смачивания [18]. Краевой угол смачивания определялся на трех местах/точках каждого образца полиэтилена и измерялся в каждом месте/точке три раза. В

работе приводятся результаты усредненных значений трех замеров в трех точках краевого угла смачивания.

2.3 Методика определения механических свойств композитов.

Механические испытания образцов исследованного полиэтилена проводились на разрывной машине марки HD-B617-S согласно ISO 527-2. Образцы для механических испытаний тестировали, при температурах $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Время выдержки между изготовлением и испытанием образцов составляло не менее 72 часов. Приведенные значения механических свойств основаны на среднем значении не менее восьми образцов (рис. 2).

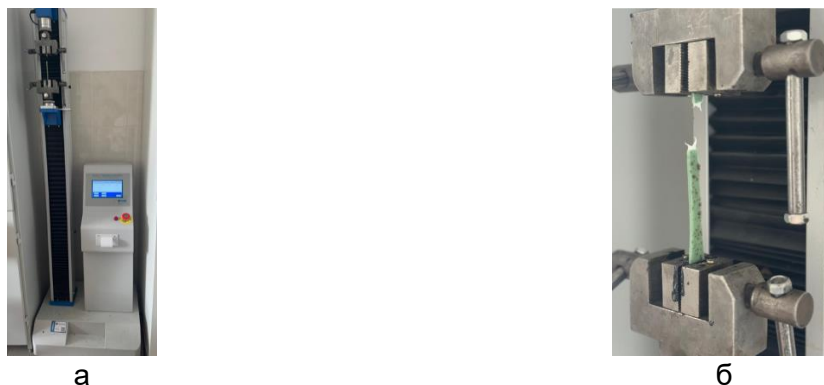


Рисунок 2 – Разрывная машина, марки HD-B617-S (а), процесс разрыва образца (б)

При проведении механических испытаний определяли следующие характеристики ротационных композитов:

1. Процент растяжения при пределе текучести, %;
2. Процент растяжения при пределе прочности, %;
3. Предел прочности на разрыв, МПа.

2.4 Подготовка образцов и проведение испытаний

Определение угла смачивания проводили на образцах ротационного полиэтилена, любезно предоставленных ТОО «AVAGRO». Размеры образцов ротационного полиэтилена (далее ПЭ): $150 \times 40 \times 10$ мм. Образцы были предварительно отчищены от загрязнений, масла и других примесей с помощью ваты, смоченной медицинским спиртом (90% раствор этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) и растворителем 646 ГОСТ 18188-2020 (состава: толуол 50%, этанол 15%, бутанол 10%, бутилацетат 10%, этилцеллозольв 8% и ацетон 7%).

Затем все образцы были промаркированы с торца, спец. этикеткой.

После выдержки образцов ротационного полиэтилена, необходимое время, они извлекались, высушивались и определялся краевой угол смачивания дистиллированной водой (согласно п.2.2).

ИК-спектроскопия образцов полиэтилена была проведена на приборе, модели инфракрасном ФТ-08.

Атомно-силовая микроскопия проводилось на сканирующем зондовом микроскопе Solver NANO производства компании NT-MDT Spectrum Instruments. Использовалась сканирующая туннельная измерительная головка в полу контактном колебательном режиме Semicontact. Скорость сканирования составляла 32,005 мкм/с. Максимальная область сканирования 92 мкм. Амплитудное значение колебаний зонда составляло 10 нм.

3. Результаты и обсуждение

3.1 Исследование влияния рециклинга ротационного полиэтилена (РПЭ) и его технологических режимов переработки на краевой угол смачивания

Влияние технологического параметра PIAT и продолжительности выдержки первичного РПЭ в жидком минеральном удобрении (Т, мин) на краевой угол смачивания ($\theta,^\circ$) дистиллированной воды представлено на рисунке 3.

По мере увеличения PIAT (с 165 до 230°C) для образцов полиэтилена без выдержки в жидком минеральном удобрении, краевой угол смачивания уменьшился на 5%. Однако, при его экспозиции (выдержке) в ЖМУ (по мере такого же увеличения PIAT) краевой угол смачивания уже уменьшился на 6,3-7,5% (с $75,74 \pm 1^\circ$ до $68,43 \pm 1^\circ$ для времени выдержки 120 часов в КАС28). Следовательно, гидрофильность поверхности полиэтилена при контакте с

КАС28 возрастает. Влияние времени выдержки РПЭ в среде жидкого минерального удобрения КАС28 на краевой угол смачивания (θ , °) дистиллированной водой представлено на рисунках 4 и 5.

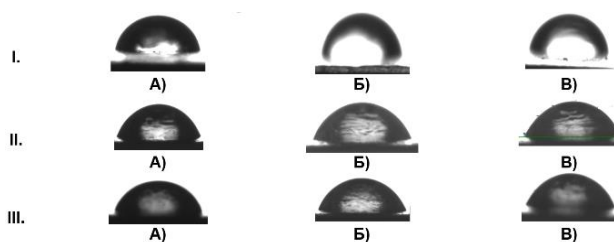


Рисунок 3 – Фотографии каплей дистиллированной воды (при $t=20^{\circ}\text{C}$) на первичном ротационном полиэтилене, марки ELTEX HD3850UA после выдержки в жидком минеральном удобрении, марки КАС28

(I) Без смачивания А) PIAT167, Б) PIAT198, В) PIAT230; (II) в течении 120 часов: А) PIAT167, Б) PIAT198, В) PIAT 230; (III) в течении 1440 часов: А) PIAT167, Б) PIAT198, В) PIAT 230

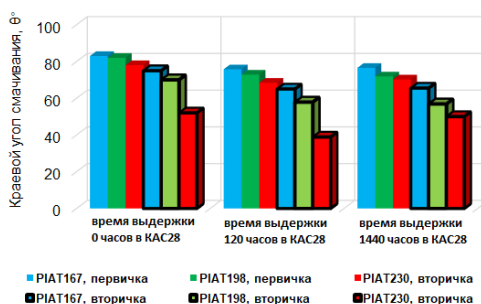


Рисунок 4 – Влияние на краевой угол смачивания (θ , °) дистиллированной водой ротационного полиэтилена, марки ELTEX HD3850UA, технологического параметра PIAT и количество его переработок (первичный/вторичный) (при различном времени выдержки полиэтилена в среде жидкого минерального удобрения КАС28; при 0, 120 и 1440 часов)

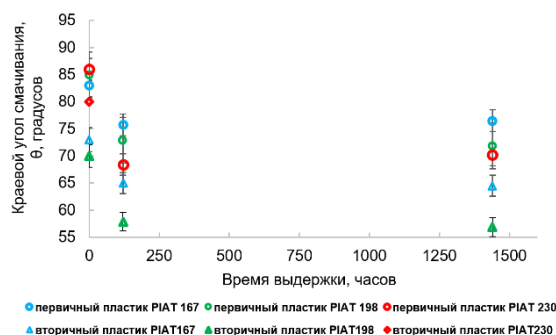


Рисунок 5 – Влияние на краевой угол смачивания (θ°) дистиллированной водой времени выдержки в среде жидкого минерального удобрения (марки КАС28) и количество переработок (первичный/вторичный) ротационного полиэтилена, марки ELTEX HD3850UA

Выдержка в среде жидкого минерального удобрения в течении 60 дней (1440 часов), для технологически приемлемого значения PIAT198, вызывает стабильное уменьшение краевого угла смачивания ротационного полиэтилена для первичного на 15%, а для вторичного на 19%. При самом низком PIAT167 изменение краевого угла смачивания в аналогичных условиях для первичного ПЭ составило 8%, для вторичного – 12,5%. Однако при максимальном PIAT 230 (по мере выдержки в жидком минеральном удобрении в течении 1440 часов) депрессия θ составляет уже 28% для первичного ПЭ и 36% для вторичного. Следовательно, можно говорить о снижении гидрофобности поверхности полиэтилена по мере роста PIAT и количества циклов переработки пластика.

Для вторичного полиэтилена (гРПЭ). наблюдается значительное снижение гидрофобности (вообще без смачивания удобрением) вызванное прошедшим циклом ротационного формования. При котором происходит длительный нагрев в кислородсодержащей атмосфере в результате предполагается образование окисленного

слоя, содержащего большое число карбоксильных групп (рис. 5). Поэтому для вторичного ПЭ наблюдается аномально высокая депрессия θ в зависимости от PIAT от 12,5 до 36% (по результатам выдержки в жидком минеральном удобрении, марки КАС28).

Следовательно, в результате изучения КУС можно говорить о значительной термоокислительной деструкции полиэтилена в процессе вторичного ротационного формования (рециклинга), в независимости от технологического параметра PIAT. Поэтому в процессе разработки ротационных композитов, с использованием вторичного полиэтилена (рПЭ) необходимо аккуратно дозировать его количество в рецептурах, для исключения резкого снижения механических свойств конечных изделий.

3.2 Исследование рециклинга ротационного полиэтилена и его технологических режимов переработки методами ИК-спектроскопии и атомно-силовой микроскопии.

Для выявления причины значительного увеличения гидрофильности исследованного РПЭ при увеличении PIAT и его рециклинге, была проведена ИК-спектроскопия образцов. Результаты ИК-спектроскопии представлены на рисунке 6.

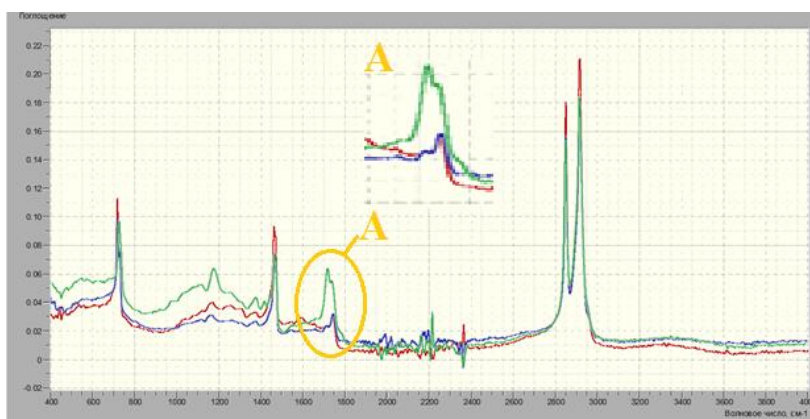


Рисунок 6 – ИК-спектры образцов первичного ротационного полиэтилена, марки ELTEX HD3850UA с различным PIAT (синяя линия – 167С°; зеленая – 230С°; красная – 198С°)

Для первичного ротационного полиэтилена при росте PIAT свыше 210°C ИК-спектроскопией фиксируется значительный рост различных полярных групп, в частности, карбоксильных (появление пика 1740см⁻¹). Данное заключение подтверждается работами F.P.C. Gomes [13], который пришел к аналогичным выводам. Однако ввиду влияния различных эффектов поверхности (шероховатость, неровности и др.) на краевой угол смачивания нами проведено дополнительное исследование образцов РПЭ атомно-силовой микроскопией, представленное на рисунке 7.

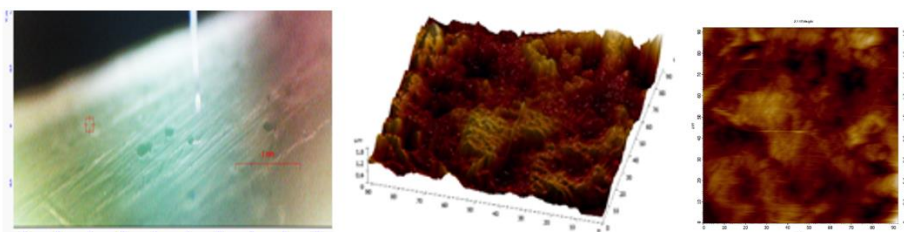


Рисунок 7 – Фотографии микропористости поверхности образца ротационного полиэтилена, марки ELTEX HD3850UA, PIAT 198 (получены на сканирующем зондовом микроскопе Solver NANO)

На всех образцах РПЭ атомно-силовой микроскопией выявлено значительное количество микропор. Так на исследованной площадке размера – 4,5 мм*0,5 мм выявлено 4 поры. Размеры данных пор варьируются в диаметре от 10 до 250 мкм и глубиной от 150нм до 125 мкм. Следовательно, с учетом результатов ИК-спектроскопии, увеличение гидрофильности РПЭ после выдержки в КАС28 может быть объяснено, тем, что жидкое удобрение проникая в микропоры при низком PIAT адсорбируется только физически, с

помощью сил Ван-дер-Ваальса. А при рециклинге РПЭ удобрение проникая в микропоры окисленного полиэтилена, адсорбируется уже не только физически, а и с помощью хемосорбции (за счет образования водородной связи между полярными карбоксильными группами и поверхностно-активными веществами в составе удобрения КАС28). В результате гидрофильность поверхности полиэтилена значительно возрастает (по мере роста РПАТ с 167 до 230°C краевой угол смачивания значительно увеличивает депрессию с 8 до 28%).

3.3 Влияние содержания вторичного ПЭ на механические свойства композитов.

В дополнение к изучению краевого угла смачивания была проведена оценка механических свойств ротационных композитов при различном содержании вторичного полиэтилена. Влияние содержания вторичного полиэтилена на предел прочности композитов представлено на рисунке 8.

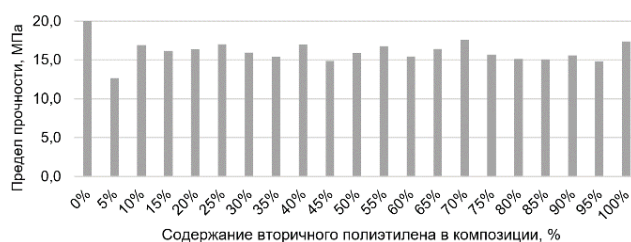


Рисунок 8 – Влияние содержания вторичного полиэтилена на предел прочности ротационных композитов

Введение вторичного полиэтилена незначительно снижает прочность ротационных композитов, порядка 15%. Влияние содержания вторичного полиэтилена на деформацию при пределе текучести (%) ротационных композитов представлено на рисунке 9, а при пределе прочности на рисунке 10.



Рисунок 9 – Влияние содержания вторичного полиэтилена на деформацию при пределе текучести (%) ротационных композитов

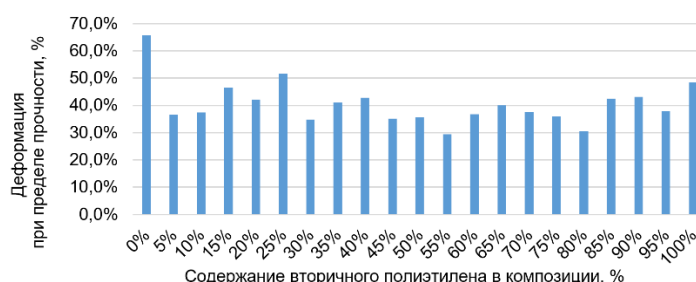


Рисунок 10 – Влияние содержания вторичного полиэтилена на деформацию при пределе прочности (%) ротационных композитов

Введение вторичного полиэтилена незначительно снижает деформацию ротационных композитов при механических нагрузках. Даже при введении 5% вторичного полиэтилена наблюдается снижение всех ключевых показателей. Однако, при содержании вторичного ПЭ 25% в композиции механические свойства находятся в пределах допустимых технических значений. Несмотря на наблюдаемое снижение отдельных показателей, оно не носит критического характера и компенсируется рядом технологических и экономических преимуществ. В частности, при содержании вторичного ПЭ на уровне 15-25% сохраняется удовлетворительный уровень прочности и пластичности изделий, достаточный для большинства промышленных применений.

Таким образом, можно говорить о допустимости введения до 20-25% вторичного полиэтилена в ротационные композиции без значительного ущерба для механических свойств изделий. Учитывая более низкую стоимость вторичного/переработанного полиэтилена, его использование в данном диапазоне позволяет обеспечить снижение себестоимости конечного продукта и повышение экологической устойчивости производственного цикла, что особенно актуально в контексте перехода к принципам «зелёной» экономики и замкнутого материального оборота. Результаты подтверждают, что рациональное сочетание первичного и вторичного полиэтилена открывает возможности для создания эффективных и конкурентоспособных ротационных композитов.

4. Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что рециклинг ротационного полиэтилена сопровождается термоокислительной деструкцией, выражающейся в образовании кислородсодержащих поверхностных групп, преимущественно карбоксильного типа, что подтверждено данными ИК-спектроскопии. Изменения в химической структуре поверхности сопровождаются повышением гидрофильности материала, о чём свидетельствует снижение краевого угла смачивания до 36%. Наиболее выраженное влияние на эти изменения оказывает сам факт повторной переработки, тогда как варьирование технологического параметра PIAT оказывает дополнительное, но менее значительное воздействие.

При введении вторичного полиэтилена в количестве от 20 до 25% обеспечиваются стабильно высокие механические свойства (предел прочности, деформации при пределе прочности и текучести) ротационных композитов. Это позволяет рекомендовать частичную замену первичного полиэтилена на вторичный без критического ухудшения эксплуатационных характеристик изделий. Таким образом, достигается баланс между экологическими и экономическими аспектами: введение до 25% переработанного материала в ротационные композиты обеспечивает снижение себестоимости продукции при сохранении её функциональности.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке рецептур ротационных композитов с управляемой степенью рециклинга, направленных на оптимизацию свойств готовых изделий и повышение устойчивости производства к сырьевым ограничениям.

References

1. Revyako M.M. Chemical technologies, biotechnology, geoecology / M.M. Revyako, E.Z. Khrol // Journal Proceedings of BSTU. Series 2. – 2008.
2. Nugent P. Guide to the Development of Applied Plastics (second edition). – 2017.
3. La Mantia F.P. An additive model to predict the rheological and mechanical properties of polypropylene blends made by virgin and reprocessed components / F.P. La Mantia, M.C. Mistretta, V. Titone // Recycling. – 2021. – № 6. – P. 2.
4. Use of Virgin/Recycled Polyethylene Blends in Rotational Moulding / S.P. Cestari et al // J. Polym. Eng. – 2021. – № 41. – P. 509-516.
5. Compatibility of HDPE/Postconsumer HDPE Blends Using Compatibilizing Agents / E. Ramírez-Vargas et al // J. Appl. Polym. Sci. – 2006. – № 100. – P. 3696-3706.
6. Tesfaw S. Evaluation of Tensile and Flexural Strength Properties of Virgin and Recycled High-Density Polyethylene (HDPE) for Pipe Fitting Application / S. Tesfaw, O. Fatoba, T. Mulatie // Mater. Today. Proc. – 2022. – № 62. – P. 3103-3113.
7. Jian Zh. Blending Recycled High-Density Polyethylene HDPE (rHDPE) with Virgin (vHDPE) as an Effective Approach to Improve the Mechanical Properties / Zh. Jian, V. Hirschberg, D. Rodrigue // Recycling. – 2023. – № 8. – № 1.(2). <https://doi.org/10.3390/recycling8010002>.
8. Postnov V.I. Features of the preparation of a polymer polymer binder to reduce the porosity of fiberglass obtained by vacuum molding / V.I. Postnov, E.A. Veshkin, P.A. Abramov // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2011. – 13, № 4(2). – P. 462-468.
9. Methods of molding aviation products from PCM(review) / E.D. Kolpachkov et al // Proceedings of VIAM. – 2019. – № 11(83). – P. 22-36.
10. Martini C.I. Processing – structure-properties of cork polymer composites / C.I. Martini, V. Gil // Polymer and Combined Materials. – 2020, Vol. 7. Dynamic pore wetting and its effects on porous

- particle flotation: A review / Y. Mao et al // International Journal of Mining Science and Technology. – 2022, vol. 28, is. 6. – P. 1365-1378. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst2022.09.014>
11. Yuan Y. Contact Angle and Wetting Properties / Y. Yuan, T.R. Lee // Surface Science Techniques eds. G. Bracco, B. Holst. Berlin; Heidelberg: Springer. – 2013. – P. 3-34. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1>.
12. Gomes P.C. Nondestructive evaluation of sintering and degradation for rotational molded polyethylene / P.C. Gomes, M.R. Thompson // Polymer Degradation and Stability. Volume 157, 2018, Pages 34-43, ISSN 0141-3910. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.09.013>.

Финансирование: Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант AP26104785).

В.Ю. Тюканько, Р.А. Тарунин, В.А. Воропаева, Р.Р. Алпысов*, А.М. Умарова

Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті,
150000, Қазақстан, Петропавл, Абай көшесі, 18

*e-mail: sparkggvpeasy27@gmail.com

АЙНАЛМАЛЫ ҚАЛЫПТАУДЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ПОЛИЭТИЛЕНДІ ЫЛҒАЛДАНДЫРУДЫҢ ШЕТКІ БҰРЫШЫНА ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада айналмалы қалыптау арқылы полиэтиленді қайта кәдеге жарату (оны қайталама өңдеу – қайта өңдеу) мәселесін зерттеу берілген. Ғылыми әдебиеттерде полиэтиленнің (РПЭ) айналмалы сорттарын қайта өңдеу өте нашар зерттелген және ұсынылған деректер көбінесе қарама-қайшы. Алайда, өнеркәсіпте қайталама полиэтиленді пайдалана отырып, айналмалы қалыптау әдісімен контейнерлерді өндіру үшін оның тозуы (қайта өңдеу жағдайында пайда болатын) ескерілуі керек, оны бағалау үшін авторлар келесі әдістерді пайдаланды: ИҚ-спектроскопия, атомдық күшті микроскопия, РПЭ бетінің гидрофобтылығын зерттеу (контакт бұрышын өлшеу арқылы) және механикалық сынақтар. Бұл ыдыстарды (минералды тыңайтқыштарды сақтауға арналған, KAS28 маркалы) кеңінен қолдануды ескере отырып, тазартылған сумен (KAS28 әсерінен кейін) РПЭ ББЗ оларды өңдеудің әртүрлі технологиялық режимдері (PIAT индикаторы) бойынша зерттелді. РПЭ қайта өңдеу полиэтиленнің бетінде карбоксил топтарының түзілуіне және оның гидрофильділігінің едәуір артуына әкелетіні көрсетілген (байланыс бұрышы 36%-ға дейін төмендеген). KAS28-де сақтау сонымен қатар қарастырылатын өңдеу параметрлеріне қарамастан қайталама және біріншілік РПЭ жасалған бұйымдардың гидрофильділігін арттырады (байланыс бұрышының 8%-дан 28%-ға дейін төмендеуі). РПЭ гидрофильділігіне ең әсер ететін фактор (зерттелетіндердің) қайта өңдеу екені көрсетілген. Композиттердегі қайталама полиэтиленнің 15-25% дейін дозаланғанда беріктік сипаттамаларында (созылу беріктігі мен деформациясында) шамалы ғана өзгерістер байқалатыны анықталды, бұл бастапқы шикізатты өнімділік қасиеттерін (қайталама полиэтиленмен) сыни жоғалтпай ішінара ауыстыруды ұсынуға мүмкіндік береді. Бұл айналмалы композиттер өндірісінде екінші реттік ПЭ-ді экономикалық тұрғыдан тиімді пайдалану перспективаларын ашады. Бұл зерттеуді қайта өңдеу кезінде РПЭ деградациясын бағалау және дайын өнімнің өнімділік қасиеттерін жақсарту үшін пайдалануға болады.

Түйін сөздер: айналмалы қалыптау, қайта өңдеу, деградация, сулау, полиэтилен.

V.Y. Tyukanko, R.A. Tarunin, V.A. Voropaeva, R.R. Alpysov*, A.M. Umarova

M. Kozybayev North Kazakhstan University,
150000, Petropavlovsk, Kazakhstan, Abaya str 18

*e-mail: sparkggvpeasy27@gmail.com

STUDY OF THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF ROTARY MOLDING ON THE WETTING EDGE ANGLE

This article presents a study of the problem of polyethylene re-utilization (its secondary processing – recycling) by rotational molding. In scientific literature, recycling of rotational grades of polyethylene (RPE) is very poorly studied, and the data presented are often contradictory. However, for the production of containers by rotational molding, using secondary polyethylene in industry, it is necessary to take into account its degradation (occurring under recycling conditions), for the assessment of which the authors used the following methods: IR spectroscopy, atomic force microscopy, study of the hydrophobicity of the RPE surface (by measuring the contact angle (CAA)) and mechanical tests. In view of the widespread use of these containers (for storing mineral fertilizer, grade KAS28), the CAA of RPE with distilled water (after exposure to KAS28)

was studied under various technological modes of their processing (PIAT indicator). It is shown that recycling of RPE leads to the formation of carboxyl groups on the surface of polyethylene and a significant increase in its hydrophilicity (the contact angle decreased to 36%). Keeping KAS28 also increases the hydrophilicity of products made of secondary and primary RPE (reduction in the contact angle from 8% to 28%) regardless of the processing parameters considered. It is shown that the most influential factor (of those studied) on the hydrophilicity of RPE is recycling. It was found that at a dosage of up to 15-25% of secondary polyethylene in composites, only minor changes in the strength characteristics (tensile strength and deformation) are observed, which allows us to recommend partial substitution of primary raw materials without critical losses in performance properties (with secondary polyethylene). This opens prospects for the economically feasible use of secondary PE in the production of rotational composites. This study can be used to assess the degradation of RPE during its recycling and improve the performance properties of finished products.

Key words: rotational molding, recycling, degradation, wetting, polyethylene.

Сведения об авторах

Виталий Юрьевич Тюканько – кандидат технических наук, PhD химии, доцент кафедры «Химия и химические технологии» Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, г. Петропавловск; e-mail: vetal3333@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1736-0283>.

Роман Андреевич Тарунин – докторант, преподаватель кафедры «Химия и химические технологии» Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, г. Петропавловск; e-mail: ratarunin@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5221-0663>.

Вера Андреевна Воропаева – магистр технических наук кафедры «Химия и химические технологии» Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, г. Петропавловск; e-mail: vera0805023@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6944-746X>.

Рустам Русланович Алпысов* – магистрант кафедры «Химия и химические технологии» Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, г. Петропавловск; e-mail: sparkggvpeasy27@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2104-0551>.

Айнель Муратбековна Умарова – студент кафедры «Химия и химические технологии» Северо-Казахстанского Университета им. М. Козыбаева, Республика Казахстан, г. Петропавловск; e-mail: ainekau@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0353-509X>.

Авторлар туралы мәліметтер

Виталий Юрьевич Тюканько – техника ғылымдарының кандидаты, химия PhD, доцент, Солтүстік Қазақстан Университетінің «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасы. М. Қозыбаева, Қазақстан Республикасы, Петропавл қаласы; e-mail: vetal3333@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1736-0323>.

Роман Андреевич Тарунин – Солтүстік Қазақстан Университетінің «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының докторанты, оқытушысы. М. Қозыбаева, Қазақстан Республикасы, Петропавл қ.; e-mail: ratarunin@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5221-0663>.

Вера Андреевна Воропаева – техника ғылымдарының магистрі, Солтүстік Қазақстан Университетінің «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының түлегі М. Қозыбаева, Қазақстан Республикасы, Петропавл қ.; e-mail: vera0805023@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6944-746X>.

Рустам Русланович Алпысов* – Солтүстік Қазақстан Университетінің «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының магистранты. М. Қозыбаева, Қазақстан Республикасы, Петропавл қ.; e-mail: sparkggvpeasy27@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2104-0551>.

Айнель Муратбековна Умарова – Солтүстік Қазақстан Университетінің «Химия және химиялық технологиялар» кафедрасының студенті. М. Қозыбаева, Қазақстан Республикасы, Петропавл қ.; e-mail: ainekau@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0353-509X>.

Information about the authors

Vitaliy Tyukanko – Candidate of Technical Sciences, PhD in Chemistry, Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technologies of the M.Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk; e-mail: vetal3333@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1736-0323>.

Roman Tarunin – PhD student, Lecturer of the Department of Chemistry and Chemical Technologies of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk; e-mail: ratarunin@ku.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5221-0663>.

Vera Voropaeva – Master of Engineering Sciences, graduate of the Department of Chemistry and Chemical Technologies of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk; e-mail: vera0805023@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6944-746X>.

Rustam Alpysov* – Master's student of the Department of Chemistry and Chemical Technologies of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk; e-mail: sparkggvpeasy27@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2104-0551>.

Ainel Umarova – Student of the Department of Chemistry and Chemical Technologies of the M. Kozybayev North Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan, Petropavlovsk; e-mail: ainekau@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0353-509X>.

Поступила в редакцию 25.09.2025

Поступила после доработки 14.11.2025

Принята к публикации 17.11.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4\(20\)-74](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-4(20)-74)

MPHTI: 31.27.21



Э.Т. Ермолдина, Е.Ю. Степанова, А.С. Зенина, Ж.Ж. Жумабекова, А.Н. Оразалиева*

Филиал РГП «Инфракос»,
050046, Казахстан, г. Алматы, пр. Абая 191
*e-mail: orazaliyevaaray@gmail.com

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ УГЛЕВОДОРОДНОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА НА РОСТ И МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РЕДИСА В УСЛОВИЯХ ВЕГЕТАЦИОННОГО ОПЫТА

Аннотация: Научное исследование посвящено оценке фитотоксического воздействия нефтепродуктов, в частности углеводородного ракетного горючего (УВГ), на растения. В лабораторных условиях в качестве тест-объекта использовался редис (*Raphanus sativus* L. var. *sativus*). Поводом для проведения работы стала необходимость экологической оценки почв, загрязнённых в районах падения частей ракетоносителей.

Основная задача заключалась в определении взаимосвязи между степенью загрязнения почвы УВГ и изменениями морфофизиологических параметров у растения-индикатора. В исследовании применялись пять вариантов почвы: три опытных с содержанием УВГ в концентрациях 100, 500 и 1000 мг/кг, а также два контрольных образца – стандартный искусственный почвенный эталон (КМ) и почва с реальной загрязнённой территории (КФ). Биотестирование проводилось в течение шести недель. В ходе эксперимента фиксировались показатели всхожести, длины стеблей и корней проростков, по которым рассчитывались индексы токсичности.

Результаты продемонстрировали угнетающее влияние УВГ на развитие растений и прорастание семян. При минимальной концентрации в 100 мг/кг наблюдалось лишь незначительное сокращение длины побегов и корней. Однако при увеличении концентрации до 500 и 1000 мг/кг негативный эффект становился более выраженным: всхожесть семян снижалась до 40% и 25% соответственно, а длина стеблей и корней уменьшалась в 2-4 раза по сравнению с контрольными образцами.

Наблюдаемые изменения ясно указывают на дозозависимый характер токсичности УВГ. Полученные данные представляют практическую ценность для разработки нормативов оценки загрязнения, проведения экологического мониторинга и планирования мероприятий по восстановлению пострадавших территорий.

Ключевые слова: фитотоксичность, ракетное топливо, углеводороды, загрязнение почвы, экотоксичность, экологическая безопасность.

Введение. Одним из наиболее распространённых загрязнителей окружающей среды в районах падения отделяющихся частей ракетоносителей являются нефтяные углеводороды. Они представляют собой сложные смеси соединений, обладающие выраженным токсическим потенциалом. Для оценки их воздействия на природные экосистемы всё чаще применяются методы биотестирования, в том числе испытания на фитотоксичность с использованием высших растений как чувствительных индикаторов. Особенно актуальны такие исследования в случае, если загрязнители почвы известны или подозреваются как фитотоксичные [1-4].

Фитотоксичность проявляется в угнетении жизнедеятельности растений: нефтяные углеводороды способны вызывать структурные изменения в клетках и тканях, нарушать