

ЖАРАТЫЛЫСТАНУ ҒЫЛЫМДАР / ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ /
NATURAL SCIENCES

DOI 10.54596/2958-0048-2026-2-12-23

УДК 678.74

МРНТ 68.47.43

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА
В РОТАЦИОННЫХ КОМПОЗИТАХ

Тюканько В.Ю.¹, Тасимова А.А.^{1*}, Хасенова Д.К.¹, Ляхова Е.Е.¹, Тарунин Р.А.¹,
Алпысов Р.Р.¹, Кусаинов А.Г.¹, Красильников Р.Е.¹

¹*НАО «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева»,
Петропавловск, Казахстан*

**Автор для корреспонденции: akniettasimova@gmail.com*

Аннотация

В работе рассмотрены современные методы утилизации пластиковых отходов (в частности полиэтилена (PE), как самого распространённого промышленного полимера) и показана наибольшая перспективность технологии вторичной переработки отходов PE. Выбрана перспективная технология переработки вторичного PE (rPE) - ротационное формование. Проанализированы все источники в международных патентных базах и БД Scopus и Web of Science с 2000 года в области использования rPE в ротационном формовании. Показано, что введение rPE в ротационные композиты позволяет получать изделия высокого качества, при снижении себестоимости продукции и одновременной утилизации отходов PE. Что значительно снижает экологическую нагрузку на окружающую среду. В заключении сделан вывод о перспективности использования rPE в ротационном формовании и как следствии построения зелёной циркуляционной экономики.

Ключевые слова: экология, пластиковые отходы, полиэтилен, вторичная переработка, ротационное формование.

РОТАЦИОНАЛДЫҚ КОМПОЗИТТЕРДЕ ПОЛИЭТИЛЕНДІ ҚАЙТА ӨНДЕП
ПАЙДАЛАНУ МҮМКІНДІКТЕРІ

Тюканько В.Ю.¹, Тасимова А.А.^{1*}, Хасенова Д.К.¹, Ляхова Е.Е.¹, Тарунин Р.А.¹,
Алпысов Р.Р.¹, Кусаинов А.Г.¹, Красильников Р.Е.¹

¹*«Манаш Козыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КЕАҚ,
Петропавл, Қазақстан*

**Хат-хабар үшін автор: akniettasimova@gmail.com*

Андатпа

Жұмыста пластикалық қалдықтарды кәдеге жаратудың заманауи әдістері (атап айтқанда, ең көп таралған өнеркәсіптік полимер ретінде полиэтилен (PE)) қарастырылып, PE қалдықтарын қайта өңдеу технологиясының ең үлкен перспективасы көрсетілген. Қайта өңдеудің перспективалық технологиясы тандалды - ротациялық қалыптау. Халықаралық патенттік базалардағы және Scopus және Web of Science ДБ-дағы барлық көздер 2000 жылдан бастап ротациялық Қалыптауда rPE пайдалану саласында талданған. Айналмалы композиттерге rPE енгізу Өнімнің өзіндік құнын төмендету және қалдықтарды бір уақытта жою кезінде жоғары сапалы өнімдерді алуға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Бұл қоршаған ортаға экологиялық жүктемені айтарлықтай төмендетеді. Қорытындылай келе, айналмалы Қалыптауда және соның салдарынан жасыл айналым экономикасын құруда rPE қолдану перспективасы туралы қорытынды жасалды.

Кілт сөздер: экология, пластик қалдықтары, полиэтилен, қайта өңдеу, айналмалы қалыптау.

PROSPECTS FOR USING RECYCLED POLYETHYLENE IN ROTARY COMPOSITES

V.Y. Tyukanko¹, A.A. Tassimova¹, D.K. Khasenova¹, E.E. Lyakhova¹, R.A. Tarunin¹,
R.R. Alpysov¹, A.G. Kusainov¹, R.E. Krasilnikov¹

^{1*} «Manash Kozybayev North Kazakhstan University» NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan

*Corresponding author: akniettasimova@gmail.com

Abstract

The paper discusses modern methods of plastic waste disposal (in particular, polyethylene (PE), as the most common industrial polymer) and shows the greatest potential of PE waste recycling technology. A promising technology for recycling secondary PE (rPE) - rotational molding - has been selected. All sources in international patent databases and Scopus and Web of Science databases since 2000 have been analyzed in the field of using rPE in rotational molding. It has been shown that the introduction of rPE into rotational composites allows for the production of high-quality products while reducing production costs and simultaneously recycling PE waste. This significantly reduces the environmental impact on the environment. In conclusion, it is concluded that the use of rPE in rotational molding is promising and can contribute to the development of a green circular economy.

Keywords: ecology, plastic waste, polyethylene, recycling, rotational molding.

Введение

Проблема эффективной утилизации пластиковых отходов в Республики Казахстан и мире сегодня крайне актуальна. С появлением первых пластмасс они сразу же заняли значительную нишу в промышленности [1]. Мировое производство пластика постоянно растет, ожидается что к 2026 году производство полиэтилена (PE) достигнет 500-600 миллионов тонн в год [2]. Из общего объема произведенного пластика перерабатывается лишь малая часть [3]. Полиэтилен - самый распространенный пластик в мире, благодаря своей прочности, низкой цене, простоте переработки и возможности модификации. Однако рост потребления PE привел к увеличению количества пластиковых отходов, которые очень медленно разлагаются в окружающей среде, создавая серьезную экологическую проблему [4, 5]. По оценкам экспертов, каждый год в окружающую среду попадает около 10 миллионов тонн пластиковых отходов [6,7]. Кроме того, производство и сжигание отходов пластика приводят к значительным выбросам парниковых газов, ускоряя изменение климата [8, 9]. При получении пластмасс на нефтехимических заводах образуется порядка 4% от общего объема глобальных выбросов CO₂ [10]. Особую актуальность вопрос с загрязнением окружающей среды пластиковым мусором приобрел в конце XX века, когда были обнаружены большие «мусорные острова» в океане [11]. Дальнейшие исследования показали, что пластиковые отходы со временем распадаются на микрочастицы, которые оказывают вредное воздействие на всю окружающую среду [12]. По статистике, около 60% пластикового мусора не подвергается переработки и загрязняют экосистему. Ежегодно около 8 миллионов тонн пластика, в большей степени - полиэтилен, оказывается в океане или на свалках [13]. Однако полиэтилен потенциально может проходить вторичную переработку (рициклинг) и использоваться для получения вторичной гранулы, из которой возможно производить мусорные пакеты, ведра и другие технические изделия [14].

1. Современные подходы к утилизации пластиковых отходов

Согласно сведениям Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) не менее 22% пластикового мусора неконтролируемого попадает в окружающую среду [15]. Часть пластиковых отходов перерабатывается процессом пиролиза, при этом получается синтез-газ и печное топливо [16]. Однако наиболее эффективным способом утилизации пластиков является их вторичная переработка, жизненный цикл РЕТ-бутылки представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Жизненный цикл РЕТ-бутылки при вторичной её переработки [17]

Вторичная переработка пластиков способствует снижению потребления нефти и газа и сокращению выбросов парниковых газов за счёт замены первичных пластмасс вторичными [18]. Увеличение количества переработки вторичного полиэтилена может значительно сократить потребность в первичном сырье, что в свою очередь снижает экологическую нагрузку на промышленность [19]. Следовательно, увеличение доли вторичной переработки полиэтилена, относится к важнейшим направлениям экологии и устойчивого развития.

В связи с этим приобретает высокую актуальность вопрос разработки новых рецептур промышленных композитов с высоким содержанием rPE. Кроме того, возникают вопросы выбора технологий переработки пластмасс с использованием rPE, среди таких методов выделяется ротационное формование, при помощи которого изготавливают полые габаритные изделия [20].

2. Обзор технологии ротационного формования

Ротационное формование представляет собой технологический процесс переработки полимерных материалов, при котором порошкообразный пластик загружается во вращающуюся форму. В процессе нагрева форма вращается одновременно вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, что обеспечивает равномерное распределение и плавление материала по всей внутренней поверхности формы. Под действием температуры частицы полимера постепенно спекаются, образуя сплошной слой заданной толщины. После достижения требуемых параметров изделие охлаждается, а полученная деталь извлекается из формы. Данная технология позволяет получать полые изделия сложной конфигурации без швов и стыков, что существенно повышает их прочность и долговечность. Важным преимуществом ротационного формования является отсутствие необходимости применения высокого давления. В отличие от методов литья под давлением, где материал подаётся в форму при значительных нагрузках, ротационное формование основано на равномерном

распределении расплавленного пластика за счёт сочетания контролируемого нагрева и вращательного движения формы. Благодаря этому процесс особенно эффективен при изготовлении крупногабаритных, прочных и долговечных пластиковых изделий [21].

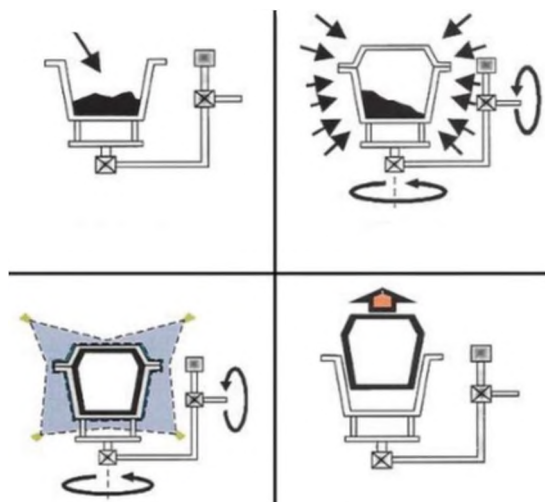


Рисунок 2. Процесс ротационного формования полимеров [22]

Ротационное формование – это процесс, протекающий при высокой температуре, низком давлении и малом усилии сдвига. Он широко используется для производства крупногабаритных полых изделий – резервуаров, контейнеров, игрушек, элементов мебели и других изделий [23-25]. Схематично процесс ротационного формования может быть описан следующими технологическими операциями:

1. Загрузка формы. В форму, изготовленную из алюминия или стали, загружается порошкообразная пластмасса. Форма герметично закрывается для предотвращения утечек.

2. Нагрев и вращение. Форма помещается в печь и нагревается при вращении по двум осям. Пластик равномерно плавится и распределяется по поверхности.

3. Охлаждение. После достижения требуемой толщины форма перемещается в охлаждающую камеру. Пластик затвердевает, сохраняя заданную форму.

4. Разбор формы. После охлаждения изделие извлекается, получая прочную бесшовную конструкцию, не требующую дополнительной сборки.



Рисунок 3. Изделия, получаемые ротационным формованием [26]

Основными преимуществами технологии являются равномерная толщина стенок, низкий уровень остаточных напряжений и минимальные затраты на оборудование [27]. С середины XX века ротационное формование активно применяется в различных отраслях - от автомобилестроения до пищевой промышленности [28].

3. Патентный анализ в области использования вторичного полиэтилена (rPE) в ротационном формовании

В 2020 г. объём рынка деталей, изготавливаемых ротационным формованием, оценивался в 10 млрд долл., к концу 2025 г. прогнозируется рост до 15 млрд при ежегодных темпах 8-10% [29], что подтверждает её перспективность, особенно в контексте использования вторичных материалов.

Первое упоминание о применении вторичного полиэтилена в данной технологии встречается в патенте WO1993000400A1 (1993), где смеси LLDPE и rHDPE (до 95%) обеспечивали синергетический эффект по ударной вязкости [30]. В дальнейшем в US6180203B1 (2001) предложена двухслойная конструкция с внешним слоем из LLDPE и внутренним из вторичных полиолефинов, что позволило сохранить прочность изделий [31]. В WO2016102341A1 (2016) использование 10-30% сшитого полиэтилена обеспечивало стабильность формования и высокие механические характеристики (модуль изгиба до 1200МПа, прочность до 20 МПа, удлинение до 5%) [32].

С 2020 г. наблюдается значительный рост интереса к композициям с вторичным полиэтиленом: в 2020–2025 гг. зарегистрировано 7 патентов против 3 ранее. Так, в CN109664584B (2020) предложен одностадийный метод получения вспенённых изделий с ударопрочностью до 85 Дж (против 14-33 vPE) [33]. В WO2021222984A1 (2021) описаны многослойные материалы с комбинацией rPE и первичного полиэтилена, обладающие хорошей перерабатываемостью и прочностью [34]. В CA3190761A1 (2021) композиции с 10-50% rPE формировали внутренний слой с шероховатостью 6,3 мкм, что повышало долговечность и адгезию покрытий [35]. Более поздние разработки (US20230093454A1, US20230124453A1, US20230339150A1, 2023) посвящены распределению rPE по внутренней поверхности изделий с получением шероховатости 4-30 мкм и улучшенной адгезии к полиуретанам [36-38]. В WO2025114813A1 (2025) предложена трёхкомпонентная смесь (60-80% MDPE, 5-25% HDPE, 10-30% rPE), обеспечивающая ударную вязкость 25-50 Дж/м [39]. Кроме полиэтилена, исследуется применение других вторичных термопластов. Так, в US11912864B2 и US20220064439A1 описаны композиции с 20-50% rPC и антипиренами (до 7%), выдерживающие 120-130°C и соответствующие UL 94 V-0 [40-41]. В US9624370B2 добавление вторичных сополимеров (например, ABS) и стабилизаторов расплава повышало ударную вязкость на 5% [42]. Отмечены также разработки «зелёных» рецептур с содержанием rPC до 90% (US20220127454A1) [43].

4. Анализ современных научных исследований в области использования вторичного полиэтилена в ротационном формовании

В отличие от патентных документов, которые в основном направлены на описание практических способов применения, научные публикации (в БД Scopus, WoS) уделяют внимание детальному анализу влияния содержания вторичного полиэтилена (rPE) на механические и др. показатели композитов. Согласно ряду исследований, увеличение доли rPE приводит к понижению ударной прочности, уменьшению относительного удлинения при разрыве и снижению модуля упругости [44-47]. Дополнительные эксперименты показали, что введение измельчённой резины в количестве 20-50%

способствует получению материалов с повышенной эластичностью, однако при чрезмерном содержании наблюдается деградация механических свойств [48].

В исследовании «Use of virgin/recycled polyethylene blends in rotational moulding» рассматривалось поведение смесей первичного и вторичного полиэтилена, полученного из различных пластиковых отходов [49]. Три типа гРЕ – из бутылок, труб и бытовых отходов - смешивали с первичным полиэтиленом средней плотности с использованием экструдера. Оптимальная концентрация переработанного полиэтилена определялась экспериментально на основании анализа ударпрочности образцов, содержащих 25, 50 и 75 процентов гРЕ. Максимальные значения прочности на удар были зафиксированы при соотношении 50/50 [50]. Полученные композиции подвергались ряду испытаний: на удар падающим грузом, изгиб, определение показателя текучести расплава (ПТР) и дифференциально-сканирующей калориметрии. Результаты показали, что полученные образцы, отличались сниженной ударной прочностью по сравнению с изделиями из чистого первичного полиэтилена, а также меньшим модулем упругости (на 20-30%). Авторы объяснили это изменениями в структуре кристаллитов и особенностями технологического процесса ротационного формования смесей [51]. При высоком содержании гРЕ в композитах изделия становились более хрупкими, а ударная вязкость снижалась на 42-74% в зависимости от концентрации вторичного компонента.

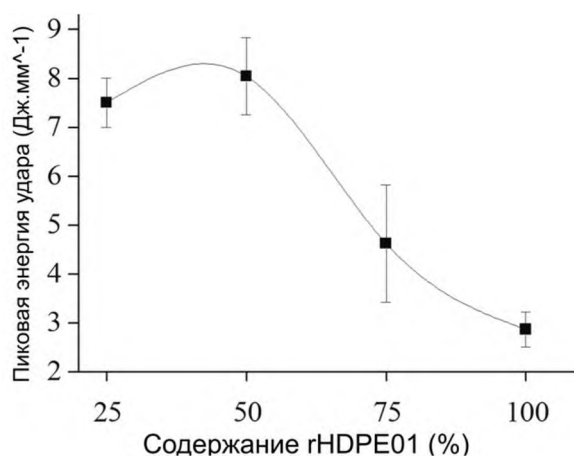


Рисунок 4. Влияние содержания вторичного полиэтилена (гHDPE) в композите на ударную вязкость (J^*mm^{-1}) [52]

В другой работе – «Mechanical and Thermal Degradation-Related Performance of Recycled LDPE from Post-Consumer Waste» – рассматривались механические и термические свойства полиэтилена низкой плотности, полученного из отходов потребления [53]. Целью эксперимента было создание переработанного материала, обладающего достаточной прочностью и устойчивостью к термодеструкции. Проведённые испытания на статическую и циклическую усталость при нагрузках до 80% от предельной прочности показали, что переработанный LDPE, изготовленный методом литья под давлением, сохраняет приемлемые эксплуатационные характеристики. Существенных изменений прочности при растяжении в процессе циклических испытаний не наблюдалось, однако фиксировался эффект накопления пластической деформации и увеличение остаточного смещения. Термический анализ выявил наличие высокомолекулярных фракций (около 84%), не поддающихся плавлению, что осложняет

процесс повторной переработки. После проведения анализа материал был измельчён, смешан с первичным полиэтиленом и использован для ротационного формования. Изучалось влияние количества гРЕ и структуры изделия (одно-, двух- и трёхслойные образцы) на прочность при растяжении, изгибе и ударную вязкость. Показано, что при увеличении содержания переработанного полиэтилена механические характеристики постепенно снижаются, однако до 35% гРЕ существенного ухудшения свойств не отмечается. Дополнительно установлено, что многослойные конструкции позволяют улучшить внешний вид изделий без снижения прочности.

В работе «Rotomolding of Thermoplastic Elastomers Based on Low-Density Polyethylene and Recycled Natural Rubber» исследовались композиционные материалы, содержащие полиэтилен низкой плотности (LDPE) и регенерированную резину, полученную из отработанных шин (GTR), с целью получения термопластичных эластомеров методом ротационного формования [54]. Изучалось влияние различных концентраций GTR (0, 20, 35 и 50% масс.) на технологические и физико-механические параметры композиций. Результаты показали, что введение каучука в композит снижает жёсткость и прочность материалов, одновременно повышая их гибкость и пластичность. Однако при этом ударная вязкость уменьшалась во всех смесях, что объясняется слабым сцеплением на границе раздела фаз GTR–LDPE и низким давлением внутри формы, приводящим к образованию пустот. При малом содержании каучука (до 20%) распределение резиновой фазы в матрице полиэтилена оставалось равномерным, тогда как при увеличении доли GTR до 50% количество дефектов и пор возрастало, ухудшая качество изделий.

Заключение

Из анализа найденных источников можно заключить что введение вторично переработанного полиэтилена (гРЕ), не всегда ухудшает свойства ротационных композитов, а часто их улучшает. Анализом работ [55-56] показано, что содержание гРЕ в ротационных композитах не должно превышать 50%. В целом совокупность патентных и научных данных подтверждает технологическую гибкость метода ротационного формования и значительный потенциал утилизации им вторичного полиэтилена (пластиковых отходов). Однако отсутствие унифицированной теоретической модели ограничивает возможность прогнозирования свойств полученных композитов: неопределённость оптимальной доли гРЕ приводит к колебаниям реологических характеристик, риску дефектов (микropустот, напряжений, расслоений) и снижению стабильности свойств конечной продукции [57-59]. Поэтому актуальной представляется задача разработки ротационных композитов, на основе гРЕ, аддитивов широкого спектра действия (антиоксидантов, термостабилизаторов и др.) и различных пигментов, с оптимальным сочетанием – реологических, механических (прочность, ударопрочность), термических и эксплуатационных свойств, получаемых из них изделий.

Литература:

1. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use and fate of all plastics ever made // *Science Advances*. 2017. - Vol. 3. - DOI:10.1126/sciadv.1700782. - Cambridge, MA, USA.
2. Statistics of plastic production 1950–2025 // *Sustainability*. 2023. - Vol. 15, No. 9, 7181. - Basel, Switzerland.
3. Global plastic production and recycling levels in 2023 // *Sustainability*. 2024. - Vol. 16, No. 12, 5122. - Basel, Switzerland.

4. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Environmental consequences of the growth in plastic waste // *Science Advances*. 2017. -Vol. 3. - DOI:10.1126/sciadv.1700782. - Cambridge, MA, USA.
5. Plastics Europe. Plastics – the Facts 2022. Report. Brussels, Belgium. 2022.
6. Microplastics in marine ecosystems // *Science*. 2015. - Vol. 347, No. 6223, 1258362. - Washington, DC, USA.
7. Distribution of microplastics in the ocean // *Environmental Research Letters*. 2014. - Vol. 9, 124002. - Bristol, UK.
8. Zhaparova S.B., Bayazitova Z.E., Bekpergenova Zh.B. Use of plastic waste in the production of polymer-sanded tiles. *Vestnik of Manash Kozybayev North Kazakhstan university*. 2020; (3 (48)):219-229.
9. Khassenova A.K., Kuantkan B. From waste to wealth: international experience in improving the processing of production and consumption waste. *Vestnik of Manash Kozybayev North Kazakhstan university*. 2023;(1 (57)):74-80.
10. Our World in Data. Greenhouse gas emissions from plastics. 2023. - Oxford, UK.
11. Day R.H., Shaw D.G. The “Great Pacific Garbage Patch”: First report // *Science*. 1988. - Vol. 241(4867): 1073–1075. - Washington, DC, USA.
12. Rochman C.M. et al. Toxicity of microplastics to marine biota // *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2014. - Vol. 111(47): 17254-17259. - Washington, DC, USA.
13. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. 2015. - Vol. 347(6223): 768-771. - Washington, DC, USA.
14. Lopez G., Artetxe M., Amutio M., Bilbao J., Olazar M. Recycling of polyethylene by pyrolysis: Process potential // *Journal of Polymers and the Environment*. 2020. - Vol. 28: 2341-2361. - New York, USA.
15. OECD. Global Plastic Pollution - Press Release. 22 Feb 2022. - Paris, France.
16. Sharuddin S.D.A., Abnisa F., Wan Daud W.M.A., Aroua M.K. Pyrolysis and gasification of plastic waste: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. - Vol. 139: 110704. - Amsterdam, Netherlands.
17. Сидоров И.П. Вторичные полимерные материалы: технология и применение. - Санкт-Петербург: Технолит, 2022. - 350 с.
18. *Frontiers in Environmental Science*. Environmental assessment of plastic waste disposal methods. 2022. -Vol. 10: 934190. - Lausanne, Switzerland.
19. CIEL Report. Reducing Plastic Production to Achieve Climate Goals. September 2023. - Washington, DC, USA.
20. Final Report D4.1-13. Applicability of rec-HDPE for rotational moulding. 2023. - Brussels, Belgium.
21. GAC Report. Rotational Molding of Plastics: Advantages and Applications. 2021. - London, UK.
22. Crawford R.J., Throne J.L. Rotational Molding of Plastics. 3rd ed. - Oxford: Elsevier, 2021. - 450 p.
23. Crawford R.J. Recent advances in the manufacture of plastic products by rotomoulding // *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. - Vol. 56: 263-271. - Amsterdam, Netherlands.
24. Ogila K.O., Shao M., Yang W., Tan J. Rotational molding: A review of the models and materials // *Express Polymer Letters*. 2017. - Vol. 11: 778-798. - Budapest, Hungary.
25. Gupta N., Ramkumar P.L., Sangani V. Review on materials, additives, processability and parameters in rotational molding // *Materials and Manufacturing Processes*. 2020. - Vol. 35: 1539-1556. - Philadelphia, USA.
26. Crawford R.J. Rotational Molding Technology. 2nd ed. - New York: John Wiley & Sons, 2018. - 115 p.
27. Crawford R.J., Throne J.L. Rotational Molding Technology. - Norwich, New York: Plastics Design Library, 2002. - 288 p.
28. Ramírez-Vargas E., Sandoval-Arellano Z., Hernández-Valdez J.S., Martínez-Colunga J.G., Sánchez-Valdés S. Compatibility of HDPE/Post-consumer HDPE blends using compatibilizing agents // *Journal of Applied Polymer Science*. 2006. - Vol. 100: 3696–3706. - Hoboken, USA.
29. ARMO 2021 Report / Industry ARC Report. Rotational Moulding Market Analysis. 2020. - Hyderabad, India. Ж 22–35. Patent sources (WIPO, USPTO, CNIPA, CIPO): Polyethylene compositions and recycled polymer technologies for rotational molding. - 1993-2024. - Geneva (CH), Washington (US), Beijing (CN), Ottawa (CA).
30. Kelly-Walley J., Martin P., Ortega Z., Pick L., McCourt M. Recent advancements towards sustainability in rotomoulding // *Materials*. 2024. - Vol. 17: 2607. - Basel, Switzerland.

31. Pick L., Hanna P.R., Gorman L. Assessment of processibility and properties of post-consumer waste polyethylene in rotational moulding // *Journal of Polymer Engineering*. 2022. - Vol. 42: 374-383. - Berlin, Germany.
32. Cestari S.P.J., Martin P.R., Hanna P.P., Kearns M., Mendes L.C., Millar B. Use of virgin/recycled polyethylene blends in rotational moulding // *Journal of Polymer Engineering*. 2021. - Vol. 41: 509-516. - Berlin, Germany.
33. Díaz S., Ortega Z., McCourt M., Kearns M.P., Benítez A.N. Recycling of polymeric cable waste by rotational moulding // *Waste Management*. 2018. - Vol. 76: 199-206. - Amsterdam, Netherlands.
34. Chaisrichawla S., Dangtungee R. The use of recycled material in rotational molding for septic tank production // *Materials Science Forum*. 2018. - Vol. 936: 151-158. -Zurich, Switzerland.
35. Ferreira T., Mendes G.A., de Oliveira A.M., Dias C.G.B.T. Manufacture and characterization of PP and HDPE blocks for construction // *Polymer*. 2022- Vol. 14: 2463. - Amsterdam, Netherlands.
36. United States Patent and Trademark Office. 2023. Rotomolding compositions with controlled PCR segregation for improved adhesion. US20230093454A1.
37. United States Patent and Trademark Office. 2023. Rotomolding compositions enabling surface roughness control via recycled polymers. US20230124453A1.
38. United States Patent and Trademark Office. 2023. Phase segregation strategies for rotomolded products with enhanced surface adhesion. US20230339150A1.
39. World Intellectual Property Organization. 2025. Three-component polyethylene compositions with rPE for rotational molding. WO2025114813A1.
40. United States Patent and Trademark Office. 2024. High heat polycarbonate compositions including recycled thermoplastic content. US11912864B2.
41. United States Patent and Trademark Office. 2017. Stabilized polycarbonate blend with post-consumer recycled plastics. US9624370B2.
42. United States Patent and Trademark Office. 2022. High heat polycarbonate compositions including recycled thermoplastic content. US20220064439A1.
43. United States Patent and Trademark Office. 2022. Recycled and renewable polymeric composition for computer chassis. US20220127454A1.
44. Kelly-Walley, Jake & Martin, Peter & Ortega, Zaida & Pick, Louise & McCourt, Mark. (2024). Recent Advancements towards Sustainability in Rotomoulding. *Materials*. 17. 2607. 10.3390/ma17112607.
45. Pick, L.; Hanna, P.R.; Gorman, L. Assessment of Processibility and Properties of Raw Post-Consumer Waste Polyethylene in the Rotational Moulding Process. *J. Polym. Eng.* 2022, 42, 374-383. [CrossRef]
46. Cestari, S.P.J.; Martin, P.R.; Hanna, P.P.; Kearns, M.; Mendes, L.C.; Millar, B. Use of Virgin/Recycled Polyethylene Blends in Rotational Moulding. *J. Polym. Eng.* 2021, 41, 509-516. [CrossRef]
47. Díaz, S.; Ortega, Z.; McCourt, M.; Kearns, M.P.; Benítez, A.N. Recycling of Polymeric Fraction of Cable Waste by Rotational Moulding. *Waste Manag.* 2018, 76, 199-206. [CrossRef] [PubMed]
48. Shaker, R.; Rodrigue, D. Rotomolding of Thermoplastic Elastomers Based on Low-Density Polyethylene and Recycled Natural Rubber. *Appl. Sci.* 2019, 9, 5430. [CrossRef]
49. Cestari, S.P. Use of virgin/recycled polyethylene blends in rotational moulding / S.P. Cestari, P.J. Martin, P.R. Hanna, M.P. Kearns, L.C. Mendes, B. Millar // *Journal of Polymer Engineering*. - 2021. - Vol. 41, № 6. - P. 509-516.
50. Ramírez-Vargas, E.; Sandoval-Arellano, Z.; Hernández-Valdez, J.S.; Martínez-Colunga, J.G.; Sánchez-Valdés, S. Compatibility of HDPE/Postconsumer HDPE Blends Using Compatibilizing Agents. *J. Appl. Polym. Sci.* 2006, 100, 3696-3706.
51. Cestari, S.P.; Martin, P.J.; Hanna, P.R.; P. Kearns, M.; Mendes, L.C.; Millar, B. Use of Virgin/Recycled Polyethylene Blends in Rotational Moulding. *J. Polym. Eng.* 2021, 41, 509-516.
52. Oliveira, L.C. Mechanical and Thermal Degradation-Related Properties of Blends of Virgin Medium-Density Polyethylene and Recycled High-Density Polyethylene / L.C. Oliveira, M.A. Silva // *Polymer Degradation and Stability*. -2017. -Vol. 136, No. 3. - P. 120–128.
53. Müller, M., Kolář, V., & Mishra, R. K. (2024). Mechanical and Thermal Degradation-Related Performance of Recycled LDPE from Post-Consumer Waste. *Polymers*, 16(20), 2863.
54. Shaker, R., and D. Rodrigue. 2019. "Rotomolding of Thermoplastic Elastomers Based on Low-Density Polyethylene and Recycled Natural Rubber." *Applied Sciences* 9 (24): 5430.
55. Data Bridge Market Research (2021), *Global Rotomolding Market Report*
56. ARMO 2021 Report / IndustryARC Report (2020), *Rotational Moulding Market Analysis*
57. Gomes F.P.C., Thompson M.R. Analysis of Mullins effect in polyethylene using ultrasonic guided waves. *Polymer Testing*, 60, 351–356 (2017). DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.04.020

58. Gomes F.P.C., West W.T.J., Thompson M.R. Effects of annealing and swelling to initial plastic deformation of polyethylene probed by nonlinear ultrasonic guided waves. *Polymer*, 131, 160–168 (2017). DOI: 10.1016/j.polymer.2017.10.041
59. ASTM D1693-21. Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA (2021).

References:

1. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use and fate of all plastics ever made // *Science Advances*. 2017. - Vol. 3. - DOI:10.1126/sciadv.1700782. - Cambridge, MA, USA.
2. Statistics of plastic production 1950–2025 // *Sustainability*. 2023. - Vol. 15, No. 9, 7181. - Basel, Switzerland.
3. Global plastic production and recycling levels in 2023 // *Sustainability*. 2024. - Vol. 16, No. 12, 5122. - Basel, Switzerland.
4. Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Environmental consequences of the growth in plastic waste // *Science Advances*. 2017. -Vol. 3. - DOI:10.1126/sciadv.1700782. - Cambridge, MA, USA.
5. *Plastics Europe. Plastics – the Facts 2022. Report.* Brussels, Belgium. 2022.
6. Microplastics in marine ecosystems // *Science*. 2015. - Vol. 347, No. 6223, 1258362. - Washington, DC, USA.
7. Distribution of microplastics in the ocean // *Environmental Research Letters*. 2014. - Vol. 9, 124002. - Bristol, UK.
8. Zhaparova S.B., Bayazitova Z.E., Bekpergenova Zh.B. Use of plastic waste in the production of polymer-sanded tiles. *Vestnik of Manash Kozybayev North Kazakhstan university*. 2020; (3 (48)):219-229.
9. Khassenova A.K., Kuantkan B. From waste to wealth: international experience in improving the processing of production and consumption waste. *Vestnik of Manash Kozybayev North Kazakhstan university*. 2023;(1 (57)):74-80.
10. Our World in Data. Greenhouse gas emissions from plastics. 2023. - Oxford, UK.
11. Day R.H., Shaw D.G. The “Great Pacific Garbage Patch”: First report // *Science*. 1988. - Vol. 241(4867): 1073–1075. - Washington, DC, USA.
12. Rochman C.M. et al. Toxicity of microplastics to marine biota // *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*. 2014. - Vol. 111(47): 17254-17259. - Washington, DC, USA.
13. Jambeck J.R., Geyer R., Wilcox C., Siegler T.R., Perryman M., Andrady A., Narayan R., Law K.L. Plastic waste inputs from land into the ocean // *Science*. 2015. - Vol. 347(6223): 768-771. - Washington, DC, USA.
14. Lopez G., Artetxe M., Amutio M., Bilbao J., Olazar M. Recycling of polyethylene by pyrolysis: Process potential // *Journal of Polymers and the Environment*. 2020. - Vol. 28: 2341-2361. - New York, USA.
15. OECD. Global Plastic Pollution - Press Release. 22 Feb 2022. - Paris, France.
16. Sharuddin S.D.A., Abnisa F., Wan Daud W.M.A., Aroua M.K. Pyrolysis and gasification of plastic waste: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. - Vol. 139: 110704. - Amsterdam, Netherlands.
17. Sidorov I.P. *Vtorichnye polimernye materialy: tekhnologiya i primenenie.* - Sankt-Peterburg: Tekhnolit, 2022. - 350 s.
18. *Frontiers in Environmental Science. Environmental assessment of plastic waste disposal methods.* 2022. -Vol. 10: 934190. - Lausanne, Switzerland.
19. CIEL Report. Reducing Plastic Production to Achieve Climate Goals. September 2023. - Washington, DC, USA.
20. Final Report D4.1-13. Applicability of rec-HDPE for rotational moulding. 2023. - Brussels, Belgium.
21. GAC Report. Rotational Molding of Plastics: Advantages and Applications. 2021. - London, UK.
22. Crawford R.J., Throne J.L. *Rotational Molding of Plastics.* 3rd ed. - Oxford: Elsevier, 2021. - 450 p.
23. Crawford R.J. Recent advances in the manufacture of plastic products by rotomoulding // *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. - Vol. 56: 263-271. - Amsterdam, Netherlands.
24. Ogila K.O., Shao M., Yang W., Tan J. Rotational molding: A review of the models and materials // *Express Polymer Letters*. 2017. - Vol. 11: 778-798. - Budapest, Hungary.
25. Gupta N., Ramkumar P.L., Sangani V. Review on materials, additives, processability and parameters in rotational molding // *Materials and Manufacturing Processes*. 2020. - Vol. 35: 1539-1556. - Philadelphia, USA.

26. Crawford R.J. Rotational Molding Technology. 2nd ed. - New York: John Wiley & Sons, 2018. - 115 p.
27. Crawford R.J., Throne J.L. Rotational Molding Technology. - Norwich, New York: Plastics Design Library, 2002. - 288 p.
28. Ramírez-Vargas E., Sandoval-Arellano Z., Hernández-Valdez J.S., Martínez-Colunga J.G., Sánchez-Valdés S. Compatibility of HDPE/Post-consumer HDPE blends using compatibilizing agents // Journal of Applied Polymer Science. 2006. - Vol. 100: 3696–3706. - Hoboken, USA.
29. ARMO 2021 Report / Industry ARC Report. Rotational Moulding Market Analysis. 2020. - Hyderabad, India. ZH 22–35. Patent sources (WIPO, USPTO, CNIPA, CIPO): Polyethylene compositions and recycled polymer technologies for rotational molding. - 1993-2024. - Geneva (CH), Washington (US), Beijing (CN), Ottawa (CA).
30. Kelly-Walley J., Martin P., Ortega Z., Pick L., McCourt M. Recent advancements towards sustainability in rotomoulding // Materials. 2024. - Vol. 17: 2607. - Basel, Switzerland.
31. Pick L., Hanna P.R., Gorman L. Assessment of processibility and properties of post-consumer waste polyethylene in rotational moulding // Journal of Polymer Engineering. 2022. - Vol. 42: 374-383. - Berlin, Germany.
32. Cestari S.P.J., Martin P.R., Hanna P.P., Kearns M., Mendes L.C., Millar B. Use of virgin/recycled polyethylene blends in rotational moulding // Journal of Polymer Engineering. 2021. - Vol. 41: 509-516. - Berlin, Germany.
33. Díaz S., Ortega Z., McCourt M., Kearns M.P., Benítez A.N. Recycling of polymeric cable waste by rotational moulding // Waste Management. 2018. - Vol. 76: 199-206. - Amsterdam, Netherlands.
34. Chairsichawla S., Dangtungee R. The use of recycled material in rotational molding for septic tank production // Materials Science Forum. 2018. - Vol. 936: 151-158. - Zurich, Switzerland.
35. Ferreira T., Mendes G.A., de Oliveira A.M., Dias C.G.B.T. Manufacture and characterization of PP and HDPE blocks for construction // Polymer. 2022- Vol. 14: 2463. - Amsterdam, Netherlands.
36. United States Patent and Trademark Office. 2023. Rotomolding compositions with controlled PCR segregation for improved adhesion. US20230093454A1.
37. United States Patent and Trademark Office. 2023. Rotomolding compositions enabling surface roughness control via recycled polymers. US20230124453A1.
38. United States Patent and Trademark Office. 2023. Phase segregation strategies for rotomolded products with enhanced surface adhesion. US20230339150A1.
39. World Intellectual Property Organization. 2025. Three-component polyethylene compositions with rPE for rotational molding. WO2025114813A1.
40. United States Patent and Trademark Office. 2024. High heat polycarbonate compositions including recycled thermoplastic content. US11912864B2.
41. United States Patent and Trademark Office. 2017. Stabilized polycarbonate blend with post-consumer recycled plastics. US9624370B2.
42. United States Patent and Trademark Office. 2022. High heat polycarbonate compositions including recycled thermoplastic content. US20220064439A1.
43. United States Patent and Trademark Office. 2022. Recycled and renewable polymeric composition for computer chassis. US20220127454A1.
44. Kelly-Walley, Jake & Martin, Peter & Ortega, Zaida & Pick, Louise & McCourt, Mark. (2024). Recent Advancements towards Sustainability in Rotomoulding. Materials. 17. 2607. 10.3390/ma17112607.
45. Pick, L.; Hanna, P.R.; Gorman, L. Assessment of Processibility and Properties of Raw Post-Consumer Waste Polyethylene in the Rotational Moulding Process. J. Polym. Eng. 2022, 42, 374-383. [CrossRef]
46. Cestari, S.P.J.; Martin, P.R.; Hanna, P.P.; Kearns, M.; Mendes, L.C.; Millar, B. Use of Virgin/Recycled Polyethylene Blends in Rotational Moulding. J. Polym. Eng. 2021, 41, 509-516. [CrossRef]
47. Díaz, S.; Ortega, Z.; McCourt, M.; Kearns, M.P.; Benítez, A.N. Recycling of Polymeric Fraction of Cable Waste by Rotational Moulding. Waste Manag. 2018, 76, 199-206. [CrossRef] [PubMed]
48. Shaker, R.; Rodrigue, D. Rotomolding of Thermoplastic Elastomers Based on Low-Density Polyethylene and Recycled Natural Rubber. Appl. Sci. 2019, 9, 5430. [CrossRef]
49. Cestari, S.P. Use of virgin/recycled polyethylene blends in rotational moulding / S.P. Cestari, P.J. Martin, P.R. Hanna, M.P. Kearns, L.C. Mendes, B. Millar // Journal of Polymer Engineering. - 2021. - Vol. 41, № 6. - P. 509-516.
50. Ramírez-Vargas, E.; Sandoval-Arellano, Z.; Hernández-Valdez, J.S.; Martínez-Colunga, J.G.; Sánchez-Valdés, S. Compatibility of HDPE/Postconsumer HDPE Blends Using Compatibilizing Agents. J. Appl. Polym. Sci. 2006, 100, 3696-3706.

51. Cestari, S.P.; Martin, P.J.; Hanna, P.R.; P. Kearns, M.; Mendes, L.C.; Millar, B. Use of Virgin/Recycled Polyethylene Blends in Rotational Moulding. *J. Polym. Eng.* 2021, 41, 509-516.
52. Oliveira, L.C. Mechanical and Thermal Degradation-Related Properties of Blends of Virgin Medium-Density Polyethylene and Recycled High-Density Polyethylene / L.C. Oliveira, M.A. Silva // *Polymer Degradation and Stability*. -2017. -Vol. 136, No. 3. - P. 120–128.
53. Müller, M., Kolář, V., & Mishra, R.K. (2024). Mechanical and Thermal Degradation-Related Performance of Recycled LDPE from Post-Consumer Waste. *Polymers*, 16(20), 2863.
54. Shaker, R., and D. Rodrigue. 2019. "Rotomolding of Thermoplastic Elastomers Based on Low-Density Polyethylene and Recycled Natural Rubber." *Applied Sciences* 9 (24): 5430.
55. Data Bridge Market Research (2021), *Global Rotomolding Market Report*
56. ARMO 2021 Report / IndustryARC Report (2020), *Rotational Moulding Market Analysis*
57. Gomes F.P.C., Thompson M.R. Analysis of Mullins effect in polyethylene using ultrasonic guided waves. *Polymer Testing*, 60, 351–356 (2017). DOI: 10.1016/j.polymer.2017.04.020
58. Gomes F.P.C., West W.T.J., Thompson M.R. Effects of annealing and swelling to initial plastic deformation of polyethylene probed by nonlinear ultrasonic guided waves. *Polymer*, 131, 160–168 (2017). DOI: 10.1016/j.polymer.2017.10.041.
59. ASTM D1693-21. Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA (2021).

Information about the authors

Tyukanko V.Y. – scientific supervisor, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: vetal3333@mail.ru;

Tassimova A.A., – corresponding author, student, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: akniettasimova@gmail.com;

Khasenova D.K. – student, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: danagul.khasenova.05@bk.ru;

Lyakhova E.E. – student, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: evnikalahova@gmail.com;

Tarunin R.A. – senior lecturer, department of International Campus, master, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: ratarunin@ku.edu.kz;

Alpysov R.R. – master's student, Department of Chemistry and chemical technologies, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: sparkggvpeasy27@gmail.com;

Kusainov A.G – master's student, Department of Chemistry and chemical technologies, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: alisher2909@gmail.com;

Krasilnikova R.E. – master's student, Department of Chemistry and chemical technologies, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: vpravdom01@gmail.com.