

DOI 10.54596/2958-0048-2025-4-37-50

УДК 674-4

МРНТИ 68.47.43

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ В РОТАЦИОННЫХ КОМПОЗИТАХ

Тюканько В.Ю.<sup>1</sup>, Серикбол Н.<sup>1\*</sup>, Нурмазанова А.А.<sup>1</sup>, Қайратұлы Р.<sup>1</sup>,  
Тарунин Р.А.<sup>1</sup>, Алпысов Р.Р.<sup>1</sup>, Кусаинов А.Г.<sup>1</sup>, Красильников Р.Е.<sup>1</sup>,  
Аканова М.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>\*HAO «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева»,  
Петропавловск, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [mursaule2018008@mail.ru](mailto:mursaule2018008@mail.ru)

### Аннотация

В настоящее время в мире наблюдается стабильный рост производства пластиковых изделий методом ротационного формования. Так по оценкам авторитетной маркетинговой компании Market.US среднегодовой темп роста ротационного формования в мире с 2025 по 2034 год составит 5,7%. А для более успешного внедрения «принципов зеленой экономики» в ротационное формование необходим значительный рост использования возобновляемых компонентов сырья, в частности для этих целей отлично подходят продукты переработки древесины. В данной работе представлен всесторонний обзор исследований в области создания рецептур на основе полиэтилена, армированных лигноцеллюлозными волокнами, такими как сизаль, сосна, лен и клен, для ротационного формования. Исследования композитов, армированных волокнами, показывают, что как тип, так и содержание лигноцеллюлозных волокон существенно влияют на конечные свойства получаемых изделий. Например, ударная вязкость и твёрдость существенно зависят от включения волокон, при этом оптимальные результаты достигаются при определённой концентрации волокон. Химическая обработка, такая как мерсеризация или другие модификации поверхности, часто используется для улучшения адгезии волокон к матрице, тем самым улучшая механические характеристики. В целом, понимание взаимосвязи между условиями обработки, характеристиками волокон и химической обработкой крайне важно для адаптации свойств композитов к различным промышленным применением.

**Ключевые слова:** ротационное формование, переработка древесины, инновационные рецептуры, полимеры, экологические материалы, технические изделия.

## АЙНАЛЫМДЫ КОМПОЗИТТЕРДЕ АҒАШ ӨНДЕУ ӨНІМДЕРІН ҚОЛДАНУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРАРЫ

Тюканько В.Ю.<sup>1</sup>, Серикбол Н.<sup>1\*</sup>, Нурмазанова А.А.<sup>1</sup>, Қайратұлы Р.<sup>1</sup>,  
Тарунин Р.А.<sup>1</sup>, Алпысов Р.Р.<sup>1</sup>, Кусаинов А.Г.<sup>1</sup>, Красильников Р.Е.<sup>1</sup>,  
Аканова М.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>\*«Манаш Қозыбаев атындағы Солтустік Қазақстан университеті» KEAK,  
Петропавл, Қазақстан

\*Хат-хабар үшін автор: [mursaule2018008@mail.ru](mailto:mursaule2018008@mail.ru)

### Аннотация

Қазіргі уақытта әлемде айналмалы қалыптау әдісімен пластикалық бұйымдар өндірісінің тұракты өсуі байкалады. Сонымен беделді маркетингтік компанияның бағалауы бойынша Market.US 2025 жылдан 2034 жылға дейін әлемде ротациялық қалыптаудың орташа жылдық өсу қарқыны 5,7% - құрайды. Айналмалы қалыптауға "Жасыл экономика принциптерін" сәтті енгізу үшін шикізаттың жаңартылатын компоненттерін пайдаланудың едөүір өсуі қажет, атап айтқанда, ағаш өндеу өнімдері осы мақсаттар үшін өте қолайлы. Бұл шолу ротациялық қалыптау үшін сисал, карағай, зығыр және клен сияқты лигноцеллюлозды талшыктармен құшайтілген поліэтилен негізіндегі құрамдастарды әзірлеу бойынша зерттеулердің жан-жакты шолуын ұсынады. Талшықпен нығайтылған композиттерге жүргізілген

зерттеулер көрсеткендей, лигноцеллюлоздық талшықтардың түрі мен мөлшері дайын өнімнің соңғы қасиеттеріне айтарлықтай әсер етеді. Мысалы, соққыға төзімділік пен қаттылық талшықтардың косылуына байланысты өзгеріп, белгілі бір талшық концентрациясында оңтайлы нәтижелерге қол жеткізуге болады. Мерцеризация немесе басқа беттік модификациялар сияқты химиялық өндсөулер талшықтың матрицаға жабысуын жаксарту үшін жиі қолданылады, осылайша механикалық қасиеттерді арттырады. Жалпы алғанда, өндсөу шарттары, талшық сипаттамалары мен химиялық өндсөу арасындағы байланысты түсіну композиттік материалдардың қасиеттерін әртүрлі өнеркәсіптік қолданбаларға бейімдеу үшін ете маңызды.

**Кілт сөздер:** айналмалы қалыптау, ағаш өндсөу, инновациялық формулалар, полимерлер, экологиялық материалдар, техникалық бұйымдар.

## PROSPECTS FOR THE USE OF WOOD PROCESSING PRODUCTS IN ROTATIONAL COMPOSITES

**Tyukanko V.Y.<sup>1</sup>, Serikbol N.<sup>1\*</sup>, Nurmazanova A.A.<sup>1</sup>, Qairatuly R.<sup>1</sup>, Tarunin R.A.<sup>1</sup>,  
Alpysov R.R.<sup>1</sup>, Kusainov A.G.<sup>1</sup>, Krasilnikov R.E.<sup>1</sup> and Akanova M.D.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>\**Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan*

*\*Corresponding author: [nursaule2018008@mail.ru](mailto:nursaule2018008@mail.ru)*

### **Abstract**

Currently, there is a steady increase in the production of plastic products using rotational molding. According to Market.US, a reputable marketing company, the average annual growth rate of rotational molding in the world from 2025 to 2034 is expected to be 5.7%. To further promote the "green economy" principles in rotational molding, there is a need for a significant increase in the use of renewable raw materials, particularly wood-based products. This review provides a comprehensive overview of research into the development of polyethylene-based formulations reinforced with lignocellulosic fibers such as sisal, pine, flax, and maple for rotational molding. Research on fiber-reinforced composites shows that both the type and content of lignocellulosic fibers significantly affect the final properties of the resulting products. For example, impact strength and hardness depend significantly on fiber inclusion, with optimal results achieved at a certain fiber concentration. Chemical treatments such as mercerization or other surface modifications are often used to improve fiber adhesion to the matrix, thereby improving mechanical properties. Overall, understanding the relationship between processing conditions, fiber characteristics, and chemical treatment is critical for tailoring composite properties to various industrial applications.

**Keywords:** rotary molding, wood processing, innovative formulations, polymers, environmental materials, technical products.

### **Введение**

Ротационное формование (или ротоформование) – это способ изготовления больших полых изделий из термопластов, размягчающихся при нагревании. Так по оценкам авторитетной маркетинговой компании Market.US среднегодовой темп роста ротационного формования в мире с 2025 по 2034 год составит 5,7%. А для успешного внедрения «принципов зеленой экономики и устойчивого развития» в данный сектор экономики необходим значительный рост использования возобновляемых компонентов сырья, в частности для этих целей отлично подходят продукты переработки древесины. Этот метод переработки пластмасс занимает больше времени, чем другие, поэтому важно выбирать пластики, способные выдерживать высокую температуру без разрушения. Самым распространенным пластиком в ротационном формовании является линейный полиэтилен низкого давления (ЛПЭНД), поскольку он может выдерживать длительное нагревание без повреждения [1-6]. Добавление лигноцеллюлозных волокон в полиэтиленовые ротационные композиты, способствует устойчивому развитию, сохраняя ценные природные ресурсы и сокращая образование отходов. Их использование способствует внедрению экологически безопасных методов

производства и разработке экологичных, возобновляемых и биоразлагаемых продуктов композитов [7]. Производство лигноцеллюлозных волокнистых полимерных композитов методом ротационного формования сопряжено со значительными трудностями, особенно в достижении равномерного распределения волокон и наполнителя в полимерной матрице. Эти проблемы могут повлиять на механические свойства и общее качество конечного продукта. В связи с этим текущие исследования направлены на разработку передовых методов переработки и специализированных совместимые вещества для улучшения интеграции волокон и повышения эксплуатационных характеристик композитов [8-11].

В данной статье рассматривается разработка композитов для ротационного формования на основе полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП) и лигноцеллюлозных наполнителей с целью повышения эксплуатационных характеристик материала для различных сфер применения. Образцы в форме полых кубов были изготовлены с использованием волокон различных размеров и специальных технологических добавок для оптимизации свойств.

### 1. Обзор технологии ротационного формирования пластмасс

Процесс ротационного формования состоит из четырех этапов (Рис.1):

Этап 1. Загрузка формы: молотый пластик (до состояния порошка) загружается в полый металлический контейнер (точно повторяющий форму готового изделия – емкость, игрушка или контейнер), называемый формой. После этого форма закрывается зажимами или винтами, для обеспечения полной герметичности [18].

Этап 2. Нагрев и вращение формы: Затем форма начинает вращаться в двух плоскостях (рис.1) и перемещается в рабочую зону машины ротационного формования. В это время включается горелка (газовая или дизельная) и нагревает воздух рабочей зоны до температуры 300-400°C. При этом происходит конвекционный нагрев формы, а вращение в двух плоскостях обеспечивает равномерное распределение расплавленного пластика по всей внутренней поверхности формы [19, 20].

Этап 3. Охлаждение: при достижении определённой температуры форма выводится из рабочей зоны машины ротационного формования. При этом форма так же вращается в двух плоскостях и начинает охлаждаться холодным воздухом, за счёт обдува специальным вентилятором. При этом жидкий пластик внутри формы начинает кристаллизоваться и формировать готовое изделие [21, 22].

Этап 4. Раскрытие формы: При достижении определённой температуры пластика (гарантирующей его кристаллизацию и формирования изделия) зажимы (или спец. винты) открывают и разнимают форму, при этом извлекается готовое изделие. После этого форма готова к использованию для изготовления следующей детали [19, 23].

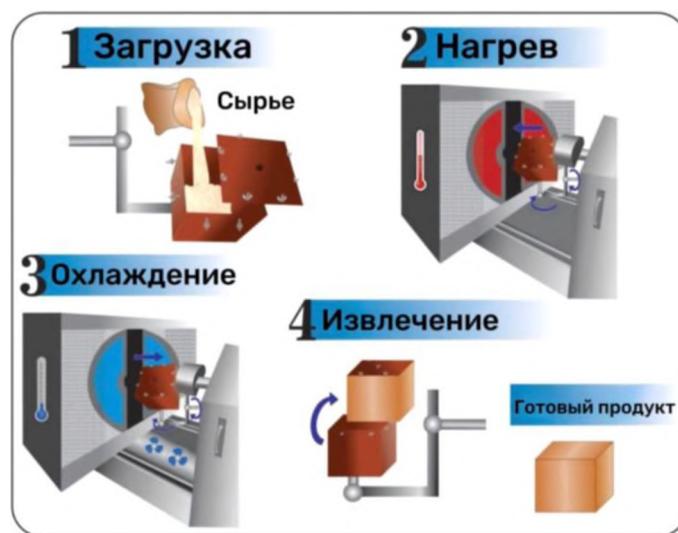


Рисунок 1. Иллюстрация процесса ротационного формования [26].

На качество изделий, получаемых методом ротационного формования, влияет огромное количество параметров. Однако их все условно можно выделить в отдельные четыре логические группы:

1) Параметры качества сырья (форма и размер порошка, насыпная плотность, сыпучесть, влажность и др.) определяют в основном толщины стенок готовых изделий. При плохой сыпучести порошка в труднодоступных местах формы формируются тонкие стенки изделия.

2) Параметры процесса спекания изделий (длительность цикла формования, скорость вращения формы, конструкция и поверхность формы, максимальная и минимальная температура воздуха в форме, температура воздуха в рабочей зоне печи и др.) определяют в целом качество изделия. При недостаточном прогреве формы в стенках изделия наблюдается большое число микропузырьков воздуха, а при перегреве фиксируется термодеструкция пластика. Оба этих явления значительно ухудшают качество и ресурс эксплуатации получаемых изделий.

3) Параметры охлаждения изделий (скорости вращения и охлаждения формы, тип охлаждающей среды, время подвода охлаждающей среды, тип разделительной смазки и др.) определяют микроструктуру (количество и размер кристаллитов) пластиковых изделий. Кроме того, параметры охлаждения изделий полностью ответственны за деформацию и коробление изделий.

4) Состав ротформовочной смеси (марка пластика, содержание и вид наполнителя, добавок (аддитивов, UV стабилизаторов, термостабилизаторов, пигментов и др.) определяют физико-механические и эксплуатационные параметры изделий.

## **2. Теоретические основы модификации лигноцеллюлозных наполнителей для ротационных композитов**

Введение лигноцеллюлозных волокон в полиэтиленовую матрицу вызвала значительный интерес благодаря своему потенциальному улучшать эксплуатационные характеристики материалов, одновременно способствуя устойчивому развитию. Включение натуральных волокон обеспечивает множество преимуществ, включая снижение общего веса композита, снижение расхода материала и эстетичный, естественный внешний вид, привлекательный для экологически сознательных

потребителей [27-29]. Кроме того, лигноцеллюлозные волокна менее композитивнее по сравнению с синтетическими аналогами, что приводит к снижению износа технологической оснастки и, как следствие, к снижению производственных затрат. Однако эти волокна по своей природе гидрофильные, что приводит к впитыванию влаги, что может со временем повлиять на долговечность и эксплуатационные характеристики композита. Для решения этих проблем во многих исследованиях изучались различные способы химической обработки, такие как мерсеризация с гидроксидом натрия (NaOH) и др., для улучшения свойств поверхности волокон. Кроме того, для улучшения адгезии на границе раздела между гидрофильными волокнами и гидрофобной полимерной матрицей часто используются связующие агенты, такие как малеинированный полиэтилен (МАПЭ). В совокупности данная модификация способствуют повышению механической прочности, термостойкости и морфологической интеграции композитных материалов [30].

Улучшение адгезии волокон к матрице является основным фактором повышения всех характеристик композитных материалов. Хорошая адгезия обеспечивает эффективную передачу напряжений между армирующими волокнами и полимерной матрицей, что приводит к получению композитов с превосходными механическими и термическими свойствами. Один из наиболее перспективных подходов к достижению этой улучшенной границы раздела заключается в использовании связующих агентов, таких как полиэтилен с привитым малеиновым ангидридом (МАРЕ). МАРЕ действует путем химического взаимодействия как с гидрофобной полимерной матрицей, так и с гидрофильными натуральными волокнами, тем самым перекрывая границу раздела и способствуя лучшей адгезии [26].

### 3. Влияние модификации лигноцеллюлозных наполнителей на свойства ротоформованных композитов

В источниках БД SCOPUS найдены следующие полимерно-лигноцеллюлозные композиты, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Ротоформованные полимерные композиты с лигноцеллюлозными волокнами [26].

Матрица композита	Тип волокна	Тип обработки волокна Химическая обработка	Сшивающий агент	Оцениваемые свойства
ПЭВП	Сизаль Кабуя	Щелочь: реакция волокна с неионное моющее средство стеариновой кислотой.	-	Плотность; Прочность на сжатие; Прочность на растяжение; Ударная прочность
ПЭВП LLDPE ПЭВП/ПЭНП	Лен	Мерсеризация с помощью NaOH	Сilan Бензоилхлорид Пероксид	Термический анализ; Твердость; Ударная прочность
LMDPE	Сизаль	-		Ударная прочность Tensil прочность

ПЭВП	Пустые плодовые грозди масличной пальмы	-	МАРЕ Силан	Прочность на изгиб; Ударная прочность
LMDPE	Агава	-		Прочность на изгиб; Ударная прочность
LLDPE	Клен	-	Пенообразующее вещество	Плотность
ПЭ	Абака Банан	Мерсеризация с помощью NaOH		Прочность на изгиб; Ударная прочность
LMDPE	Авага	-	Пенообразующий агент	Плотность; морфология
LLDPE	Клен	-	МАРЕ	Прочность на изгиб; Ударная прочность; Прочность на растяжение;
ЛМДПЭ	Пенька	Щелочь	МАРЕ	Термический анализ; Морфология

\*HDPE: полиэтилен высокой плотности; LMDPE: линейный полиэтилен средней плотности; LLDPE: линейный полиэтилен низкой плотности; MAPE: полиэтилен, привитый малеиновым ангидридом.

Исследования Рахмат и Марадзи [31] предоставили ценную информацию об эффективности MAPE в качестве связующего агента в композитах на основе полиэтилена, армированного натуральными волокнами. В ходе исследования фруктовые волокна, в частности волокна масличной пальмы, вводились в полиэтилен высокой плотности (HDPE) в различных весовых соотношениях: 5%, 10%, 15% и 20%. Волокна обрабатывались MAPE или силановыми связующими агентами для оценки их влияния на механические свойства композита. Результаты продемонстрировали значительное улучшение прочности на растяжение, изгиб и ударную вязкость при добавлении этих химических обработок. В частности, присутствие MAPE способствовало лучшей адгезии волокон к матрице, что приводило к более эффективному переносу напряжений и повышению механических характеристик. Однако исследование также показало, что размер волокон играет важную роль в свойствах композита. Более крупные волокна, особенно после химической обработки, имели тенденцию к снижению общей прочности композита. Это снижение объяснялось трудностями в достижении равномерного распределения и надлежащего сцепления с более крупными волокнами, что могло привести к появлению точек концентрации напряжений и дефектов в материале. Следовательно, оптимизация размера волокон и условий обработки имеет решающее значение для максимизации характеристик композита.

Кроме того, исследователи отметили, что обработанные волокна абаки демонстрируют более высокую термическую стабильность по сравнению с банановыми волокнами. Эта повышенная стабильность была подтверждена термогравиметрическим анализом (ТГА), который показал на 14% более высокую температуру термической деградации для обработанных волокон абаки. Сниженная гидрофильность волокон абаки по сравнению с банановыми волокнами способствовала улучшению их термических свойств, что сделало их более подходящими для применений, требующих

более высокой термостойкости. Помимо механических и термических улучшений, обработка волокон также влияла на технологичность композитов. Композиты с необработанными волокнами обрабатывались легче, образуя меньше агломератов и приводя к получению визуально более привлекательных деталей, полученных ротационным формованием. В процессе обработки волокна абаки и банановых волокон равномерно распределялись по полимерной матрице, что приводило к улучшению качества поверхности и более стабильным свойствам конечных изделий.

Основываясь на этих результатах, Крисерос [32] и соавторы исследовали композиты на основе линейного полиэтилена средней плотности (ЛПЭСП), полученные ротационным формованием, включающие как обработанные (с помощью МАРЕ), так и необработанные натуральные волокна. Их работа была направлена на дальнейшее изучение влияния химической обработки на переработку, диспергирование и общие характеристики композитов ЛПЭСП, армированных натуральными волокнами, с акцентом на такие области применения, как ротационное формование, где качество поверхности и однородность имеют решающее значение.

#### 4. Влияние размера и содержания волокон на свойства композитов

Влияние размера и содержания волокон играет ключевую роль в определении общих свойств композитных материалов. Эти факторы имеют решающее значение при разработке композитов с требуемыми механическими, термическими и технологическими характеристиками. Недавние исследования показывают, как оптимизация размеров волокон и уровней их включения может значительно улучшить эксплуатационные характеристики композитов, предоставляя ценную информацию материалovedам и инженерам.

Ханана и др. [33] провели исследование влияния размера волокон на процессы ротационного формования, уделив особое внимание лигноцеллюлозным волокнам, полученным из клена. Они обнаружили, что измельчение кленовых волокон до размера примерно от 355 до 500 микрометров эффективно предотвращает образование пустот и выделение газа в процессе ротационного формования. Такой размерный диапазон способствует лучшей упаковке и уменьшению газопроницаемости, что приводит к получению композитов с меньшим количеством дефектов и улучшенной структурной целостности.

Рэймонд и Родриг [34] исследовали влияние размера волокон на эксплуатационные характеристики композитов. Они включили кленовые волокна размером от 125 до 250 микрометров в смесь линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП) с вспенивающим агентом. Их результаты показали, что использование 20% веса этих волокон заметно улучшило механические свойства композита. В частности, модуль упругости при изгибе увеличился примерно на 61%, что указывает на большую жесткость и сопротивление изгибу, в то время как модуль упругости при растяжении улучшился на 24%, что отражает повышенную прочность на растяжение и жесткость. Подчеркивая далее важность размера волокон, влияние комбинирования различных размеров волокон агавы, в диапазоне от 150 до 300 микрометров, в композитной матрице, состоящей на 90% из линейного полиэтилена средней плотности (ЛПЭНП). Их исследование показало, что использование смеси волокон разных размеров обеспечивает превосходные механические свойства по сравнению с композитами, армированными волокнами одного размера. Этот подход подчеркивает преимущества индивидуального распределения волокон по размерам для оптимизации характеристик композита. Помимо размера волокон, решающими факторами являются также тип и содержание

волокон. Ван и соавторы исследовали влияние включения льняных волокон в полиэтиленовые матрицы. Они обнаружили, что добавление 10% льняных волокон minimally влияет на прочность композита на разрыв, но значительно повышает ударную вязкость, увеличивая ее со 190 до 219 кДж/м. Примечательно, что температура плавления композита осталась неизменной, что свидетельствует о том, что добавление волокон не повлияло на термические свойства. Это позволяет предположить, что льняные волокна могут быть использованы для повышения ударной вязкости без ущерба для термостойкости, что делает их пригодными для применений, требующих ударопрочности.

Более того, оптимальное содержание волокон часто зависит от марки полимера. Например, исследования показывают, что для композитов на основе ЛПЭНП и волокон агавы содержание волокон около 10% обеспечивает наилучшую прочность на разрыв. Более высокое содержание волокон, как правило, приводит к плохой смачиваемости и недостаточной адгезии волокон к матрице, что снижает механические преимущества. Поэтому сбалансированное содержание волокон имеет решающее значение для достижения максимального армирования без возникновения трудностей при обработке или ухудшения свойств [35].

Было проведено комплексное исследование для оценки влияния введения химического вспенивающего агента азодикарбонамида (АДА) в композиты на основе линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП) с различным содержанием кленового волокна. Основной целью было понять, как различные концентрации АДА влияют на физико-механические свойства получаемых композитов, особенно в отношении содержания волокон и формирования ячеистой структуры.

Исследование показало, что оптимальное количество АДА для достижения эффективного вспенивания составляет 0,4%. При этой концентрации композит демонстрирует более высокую плотность, приблизительно 0,449 г/см<sup>3</sup>, что свидетельствует о хорошо развитой ячеистой структуре с достаточной стабильностью пены. Интересно, что при снижении содержания АДА до 0,3% композиты демонстрируют более однородную ячеистую морфологию. Это говорит о том, что несколько более низкое содержание вспенивающего агента способствует более равномерному распределению пузырьков в матрице, что критически важно для некоторых применений, требующих однородной ячеистой структуры [34].

Предыдущие исследования предоставляют контекст и подтверждают эти результаты. Васкес-Флетес [36] и др. исследовали включение азодикарбонамида в ЛПЭНП в сочетании с волокнами агавы в диапазоне от 5% до 15%. Их результаты показали существенное снижение плотности композита – до 28%, – что подчеркивает эффективность АДА как вспенивающего агента для снижения веса материала при сохранении структурной целостности.

Дополнительные исследования, проведенные Реймондом и Родриг [60], показали, что содержание волокон из древесины клена в размере 20% является оптимальным для композитов ЛПЭНП, полученных ротационным формированием, улучшая механические свойства и технологичность. Полученные результаты подтверждают эти выводы, подтверждая, что содержание волокон вблизи этого уровня обеспечивает максимальную жесткость и структурные характеристики.

В стандартном анализе композитов на основе лигноцеллюлозных волокон наличие полимерных матриц на основе метилакрилата (МАРЕ), содержание и тип волокон являются критическими факторами, влияющими на обработку и эксплуатационные

характеристики. Композиты, включающие МАРЕ и содержащие до 20% волокон, продемонстрировали наиболее благоприятные характеристики, включая повышенную прочность и долговечность. Оптимальный баланс между армированием волокнами и совместимостью с матрицей был очевиден при данном уровне нагрузки волокнами, что способствовало лучшему диспергированию и межфазному склеиванию [26].

### 5. Теоретические основы модифицирования лигносульфонатами ротационных композитов

Одними из перспективных добавок в ротационные композиты могут рассматриваться лигносульфонаты. Лигносульфонаты – это водорастворимые натриевые производные лигнина, образующиеся в качестве побочных продуктов сульфитного процесса варки древесины (Рис.2). Эти универсальные соединения обладают высокой поверхностной активностью, что делает их эффективными поверхностно-активными веществами в различных промышленных применениях. Они широко используются в строительстве в качестве добавок к бетону для повышения его удобоукладываемости и прочности, в сельском хозяйстве в качестве почвоулучшителей, а также в производстве kleев и связующих. Благодаря своей биоразлагаемости и экологичности лигносульфонаты всё чаще используются в экологически устойчивых промышленных технологиях [17].

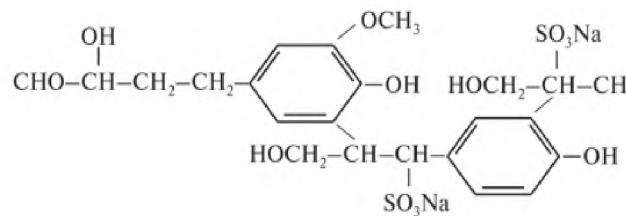


Рисунок 2. Структурная формула промышленного лигносульфаната [37]

### Заключение и выводы

Ротационное формование в настоящее время стало распространенным методом переработки композитов на основе полиэтилена и лигноцеллюлозных волокон. Введение натуральных волокон в полимерную матрицу улучшает механические свойства композитов, такие как прочность на разрыв и жесткость, а также способствует экологической устойчивости. Для дальнейшего улучшения взаимодействия волокон с полиэтиленом часто применяется химическая обработка поверхности, которая значительно повышает механическую прочность и долговечность композита. Среди важнейших параметров, определяющих свойства данных композитов важнейшую роль играет содержание волокон; исследования показывают, что оптимальное содержание волокон около 20% обеспечивает наилучший баланс прочности и технологичности. Тип используемых волокон, например, койр, агава, масличная пальма или клен, также влияет на эксплуатационные характеристики композитов, причем предпочтение отдается натуральным волокнам благодаря их высоким механическим свойствам и низкой стоимости. Кроме того, обработка волокон такими агентами, как МАРЕ, улучшает адгезию волокон с матрицей, что приводит к улучшению качества и эксплуатационных характеристик композита. Обзор приведенной литературы позволяет заключить о перспективности разработки полимерно-лигноцеллюлозных композитов.

**Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант АР26104785). Данная статья направлена на решение практической задачи предприятий из реального сектора экономики Казахстана (в частности ТОО «AVAGRO») – разработке ротационных композитов с использованием продуктов переработки древесины.**

**Литература:**

1. Анисько Й., Барчевски М., Мъетлински П., Пясецки А., Шульц Й. Повышение ценности одноразовых стаканчиков из полилактида (ПЛА) с помощью технологии ротационного формования: влияние предварительной обработки шлифованием и термической обработкой. Испытание полимеров. 107, 107481 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107481>
2. Гупта Н., Рамкумар П.Л. Влияние содержания койра на механические и термические свойства смеси ЛПЭНП/койра, обработанной методом ротационного формования. Садхана, 46, 40 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01566-8>
3. дель Валье Эспиноза Леон Л., Эскосио В.А., Висконте Л. LY, Jandorno JC Jr., Pacheco EBAV: Ротационная формовка и полиэтиленовые композиты с лигноцеллюлозными материалами, полученными методом ротационного формования: обзор. Журнал «Армированные пластики и композиты», 39, 459–472 (2020). <https://doi.org/10.1177/0731684420916529>
4. Алеман, демократ, Маккорт М., Кернс, депутат, Мартин П.Дж., Баттерфилд Дж. Разработка термопластичных армирующих волокон для процесса ротационного формования. в «Трудах 21-гоул. Международная конференция ESAFORM по формообразованию материалов: ESAFORM 2018, Палермо. Италия' 120002 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5034970>
5. Ханана Ф.Е., Дезире С.Ю., Родриг Д. Морфология и механические свойства линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП), армированного кленом, полученного методом ротационного формования: влияние содержания волокон и обработки поверхности. Полимеры и полимерные композиты, 26, 299–308 (2018). <https://doi.org/10.1177/096739111802600404>
6. Хёфлер Г., Лин Р.Дж., Джаяраман К. Ротационное формование и механическая характеристика полиэтиленов, армированных галлуазитом. Журнал исследований полимеров, 25, 32–142 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1525-3>
7. Мухтаба М., Фракето Л.Ф., Фазели М., Мукерджи С., Савасса С.М., де Медейрос Г.А., до Эсийрито Санту Переира АЕС, Манчини С.Д., Липпонен Х., Вилапланя Ф. Лигноцеллюлозная биомасса из сельскохозяйственных отходов для экономики замкнутого цикла: обзор с акцентом на биотопливо, биокомпозиты и биопластики. - Журнал «Чистое производство», 402, 136815 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815>
8. Хейна А., Барчевски М., Анджеевски Й., Космела П., Пясецки А., Шостак М., Куанг Т. Ротационное формование линейных композитов из полиэтилена низкой плотности с наполнителем из пшеничных отрубей. - Полимеры, 12, 1004 (2020). <https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1184556>
9. Анджеевский Й., Кравчак А., Весолы К., Шостак М. Ротационное формование биокомпозитов с добавлением наполнителя из гречневой лузги. Оценка корреляции структура-свойства для материалов на основе полиэтилена (ПЭ) и полимолочной кислоты (ПЛА). Композиты. Часть В: Инженерное дело, 202, 108410 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100034>
10. Ханана Ф.Е., Родриг Д. Влияние размера частиц, содержания волокон и обработки поверхности на механические свойства линейного полиэтилена низкой плотности (ЛПЭНП), армированного кленом, полученного методом ротационного формования. Полимеры и полимерные композиты, 29, 343–353 (2021). <https://doi.org/10.1177/0967391120916602>
11. Сарайва А.Б., Пачеко ЭБАВ, Гомеш Г.М., Висконте ЛЛИ, Бернардо К.А., Симойнс К.Л., Соарес А.Г. Сравнительная оценка жизненного цикла упаковки манго, изготовленной из полиэтилена/натурального волокна и картона. Журнал «Чистое производство», 139, 1168–1180 (2016). <https://doi.org/10.3390/su16031223>
12. Greco A. и Maffezzoli A. Анализ пригодности поли(молочной кислоты) в процессе ротационного формования. Adv Polym Technol 2015; 34: 21505-21501.
13. Greco A., Maffezzoli A. и Forleo S. Спекание порошков PLLA для ротационного формования. Thermochem Acta 2014; 582: 59-67.

14. Greco A. и Maffezzoli A. Ротационное формование биоразлагаемых композитов, полученных из PLA, усиленного древесной основой из кладодов *opuntia ficus indica*. *J Appl Polym Sci* 2015; 132: 42447.
15. Gonzalez-Lopez M.E., Perez-Fonseca A.A., Cisneros- Lopez E.O., et al. Effect of maleated PLA on the proper-ties of rotomolded PLA-Agave fiber biocomposites. *J Polym Environ* 2019; 27: 61-73.
16. Cisneros-Lopez O.E., Perez-Fonseca A.A., Gonzalez-Garcia Y., et al. Биокомпозиты из полимолочной кислоты и агавового волокна, полученные методом ротационного формования: сравнительное исследование с компрессионным формированием. *Adv Polym Technol* 2018; 37: 2528-2540.
17. Литвиненко Р.Ю. Древесные опилки как химические реагенты. Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых. <https://scienceforum.ru/2014/article/2014000214>
18. Mitchell P.E. Производство пластиковых деталей. In: Справочник инженера-инструментальщика и инженера-технолога. Общество инженеров-технологов, Мичиган, Соединенные Штаты Америки. 1996, pp. 1-13.
19. Rao MA and Thorone JL. Principles of rotational mold-ing. *Polym Eng Sci* 1972; 12: 237-249.
20. Crawford R.J. and Kearns M.P. Практическое руководство по ротационному формированию. 2-е изд. - Шрусбери: Smithers Rapra, 2012.
21. Asgarpour M, Bakir F, Khelladi S, et al. Характеристика и моделирование спекания полимерных частиц. *J Appl Polym Sci* 2011; 119: 2784-2792.
22. Torres F.G., Carrillo M. и Cubillas M.L. Плотность расплава полимерных порошков, наполненных натуральными волокнами. *Polym Polym Compos* 2006; 14: 691-700.
23. Liu G., Park C.B. и Lefas J.A. Производство пенопластов низкой плотности из LLDPE при ротационном формировании. *Polym Eng Sci* 1998; 38: 1997-2009.
24. Aleksander Hejna. Кафедра технологии полимеров, Гданьский технологический университет, Нарутовича, 11/12, 80-233 Гданьск, Польша. Вращательное формование линейных композитов из полиэтилена низкой плотности с наполнителем из пшеничных отрубей. <https://doi.org/10.3390/polym12051004>
25. Петар Антов. Структурное применение экологически чистых композитов из переработанных древесных волокон, скреплённых лигносульфонатом магния. Кафедра механической обработки древесины, факультет лесной промышленности, Университет лесного хозяйства, 1797 София, Болгария. 2020 Прикладные науки, 10(21), 7526; <https://doi.org/10.3390/app10217526>
26. Лумерка Дель В. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* - апрель 2020 г. DOI: 10.1177/0731684420916529
27. Stamboulis A., Baillie C.A., Garkhil S.K., et al. Экологическая долговечность льняных волокон и их композиций полипропиленовой матрицы. *Appl Compos Mater* 2000; 7: 273-294.
28. Thakur V.K., Thakur M.K. and Gupta R.K. Обзор: полимерные композиты на основе сырых натуральных волокон. *Int J Polym Anal Charact* 2014; 19: 256-271.
29. Bourai K., Riedl B. и Rodrigue D. Влияние температуры на теплопроводность древесно-пластиковых композитов. *Polym Polym Compos* 2013; 21: 413-422.
30. Wang B., Panigrahi S., Tabil L., et al. Предварительная обработка льняных волокон для использования в биокомпозитах ротационного формования. *J Reinf Plast Compos* 2007; 26: 447-463.
31. Rahmat A.R. and Maradzi M.A. Механические свойства полиэтиленовых композитов, армированных волокнами, полученных методом ротационного формования пустых фруктовых гроздей. *J Chem Nat Res Eng* 2008; 2: 41-52.
32. Cisneros-Lo' pez E.O., Gonza' lez-Lopez M.E., Perez-Fonsoca A.A., et al. Влияние содержания волокон и обработки поверхности на механические свойства композитов из натуральных волокон, полученных методом ротоформования. *J Compos Interf* 2017; 24: 35-53
33. Hanana F.E., Yomeni C.D. и Rodrigue D. Морфология и механические свойства армированного кленом LLDPE, полученного методом ротационного формования: Влияние содержания волокон и обработки поверхности. *Polym Polym Compos* 2018; 26: 299-308.
34. Raymond A. и Rodrigue D. Пенопласти и древесно-композитные пенопласти, полученные ротоформованием. *Cell Polym* 2013; 32: 199-212.
35. Lopez-Banuelos R.H., Robledo-Ortiz J.R., Ortega-Gudin or P., et al. Ротационное формование композиционных материалов из натуральных волокон и полиэтилена. In: SPE Plastics Research Online, 9 июля 2012 г., № 004326, стр. 1-3.

36. Vazquez-Fletes R.C., Rosales-Rivera L.C., Moscoso-Sa'ncchez F.J., et al. Получение и характеристика многослойного вспененного композита методом ротационного формования. *Polym Eng Sci* 2016; 56: 278-286.

37. Лигносульфат. Рисунок 2. <https://studref.com/htm/img/40/8732/22.png>

**References:**

1. Anis'ko J., Barchevski M., M'etlinski P., Pyasecki A., Shul'c J. Povyshenie cennosti odnorazovyh stakanchikov iz polilaktida (PLA) s pomoshch'yu tekhnologii rotacionnogo formovaniya: vliyanie predvaritel'noj obrabotki shlifovaniem i termicheskoy obrabotkoj. Ispytanie polimerov. 107, 107481 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107481>
2. Gupta N., Ramkumar P.L. Vliyanie soderzhaniya kojra na mekhanicheskie i termicheskie svojstva smesi LPENP/kojra, obrabotannoj metodom rotacionnogo formovaniya. *Sadhana*, 46, 40 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01566-8>
3. del' Val'e Espinoza Leon L., Eskosio V.A., Viskonte L. LY, Jandorno JC Jr., Pacheco EBAV Rotacionnaya formovka i polietilenovye kompozity s lignocellyuloznymi materialami, poluchennymi metodom rotacionnogo formovaniya: obzor. *Zhurnal «Armirovannye plastiki i kompozity»*, 39, 459–472 (2020). <https://doi.org/10.1177/0731684420916529>
4. Aleman, demokrat, Makkort M., Kerns, deputat, Martin P. Dzh., Batterfield Dzh. Razrabotka termoplastichnyh armiruyushchih volokon dlya processa rotacionnogo formovaniya. v «Trudah 21-goul. Mezhdunarodnaya konferenciya ESAFORM po formoobrazovaniyu materialov: ESAFORM 2018, Palermo. Italiya' 120002 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5034970>
5. Hanana F.E., Dezire S.YU., Rodrig D.: Morfologiya i mekhanicheskie svojstva linejnogo polietilena nizkoj plotnosti (LPENP), armirovannogo klenom, poluchennogo metodom rotacionnogo formovaniya: vliyanie soderzhaniya volokon i obrabotki poverhnosti. *Polimery i polimernye kompozity*, 26, 299–308 (2018). <https://doi.org/10.1177/096739111802600404>
6. Hyofler G., Lin R.Dzh., Dzhayaraman K. Rotacionnoe formovanie i mekhanicheskaya harakteristika polietilenov, armirovannyh galluazitom. *Zhurnal issledovanij polimerov*, 25, 32–142 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1525-3>
7. Muhtaba M., Fracheto L.F., Fazeli M., Mukerdzhi S., Savassa S.M., de Medejros G.A., do Esijrito Santu Perejra A.E.S., Manchini S.D., Lipponen H., Vilaplana. F. Lignocellyuloznaya biomassa iz sel'skohozyajstvennyh othodov dlya ekonomiki zamknutogo cikla: obzor s akcentom na biotoplivo, biokompozity i bioplastiki. *Zhurnal «CHistoe proizvodstvo»*, 402, 136815 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815>
8. Hejna A., Barchevski M., Andzheevski J., Kosmela P., Pyasecki A., Shostak M., Kuang T. Rotacionnoe formovanie linejnyh kompozitov iz polietilena nizkoj plotnosti s napolnitelem iz pshenichnyh otrubej. *Polimery*, 12, 1004 (2020). <https://doi.org/10.1080/09276440.2016.1184556>
9. Andzheevskij J., Kravchak A., Vesoly K., Shostak M. Rotacionnoe formovanie biokompozitov s dobavleniem napolnitelya iz grechnevoj luzgi. Ocenka korrelyaci struktura-svojstva dlya materialov na osnove polietilena (PE) i polimolochnoj kislotoj (PLA). *Kompozity. Chast' B: Inzhenernoe delo*, 202, 108410 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scca.2023.100034>
10. Hanana F.E., Rodrig D. Vliyanie razmera chastic, soderzhaniya volokon i obrabotki poverhnosti na mekhanicheskie svojstva linejnogo polietilena nizkoj plotnosti (LPENP), armirovannogo klenom, poluchennogo metodom rotacionnogo formovaniya. *Polimery i polimernye kompozity*, 29, 343–353 (2021). <https://doi.org/10.1177/0967391120916602>
11. Sarajva A.B., Pacheko EBAV, Gomes G.M., Viskonte LLI, Bernardo K.A., Simojns K.L., Soares A.G. Sravnitel'naya ocenka zhiznennogo cikla upakovki mango, izgotovленnoj iz polietilena / natural'nogo volokna i kartona. *Zhurnal «Cistoe proizvodstvo»*, 139, 1168–1180 (2016). <https://doi.org/10.3390/su16031223>
12. Greco A i Maffezzoli A. Analiz prigodnosti poli(molochnoj kislotoj) v processe rotacionnogo formovaniya. *Adv Polym Technol* 2015; 34: 21505-21501.
13. Greco A., Maffezzoli A i Forleo S. Spekanie poroshkov PLLA dlya rotacionnogo formovaniya. *Thermochim Acta* 2014; 582: 59-67.
14. Greco A i Maffezzoli A. Rotacionnoe formovanie biorazlagаемых kompozitov, poluchennyh iz PLA, usilennogo drevesnoj osnovoj iz kladodov opuntia indica. *J Appl Polym Sci* 2015; 132: 42447.
15. Gonzalez-Lopez M.E., Perez-Fonseca A.A., Cisneros- Lopez E.O., et al. Effect of maleated PLA on the proper-ties of rotomolded PLA-Agave fiber biocomposites. *J Polym Environ* 2019; 27: 61-73.

16. Cisneros-Lopez O.E., Perez-Fonseca A.A., Gonzalez- Garcia Y., et al. Biokompozity iz polimolochnoj kisloty i agavovogo volokna, poluchennye metodom rotacionnogo formovaniya: sravnitel'noe issledovanie s kompressionnym formovaniem. *Adv Polym Technol* 2018; 37: 2528-2540.
17. Litvinenko R.Yu. Drevesnye opilki kak himicheskie reagenty. Vladimirsij gosudarstvennyj universitet imeni A.G. i N.G. Stoletovyh. <https://scienceforum.ru/2014/article/2014000214>
18. Mitchell P.E. Proizvodstvo plastikovyh detalej. In: *Spravochnik inzhenera-instrumental'shchika i inzhenera-tehnologa. Obshchestvo inzhenerov-tehnologov, Michigan, Soedinennye Shtaty Ameriki.* 1996, pp. 1-13.
19. Rao MA and Thorone JL. Principles of rotational mold-ing. *Polym Eng Sci* 1972; 12: 237-249.
20. Crawford R.J. and Kearns M.P. Prakticheskoe rukovodstvo po rotacionnomu formovaniyu. 2-e izd. - Shrusberi: Smithers Rapra, 2012.
21. Asgarpour M., Bakir F., Khelladi S., et al. Harakteristika i modelirovaniye spekaniya polimernyh chastic. *J Appl Polym Sci* 2011; 119: 2784-2792.
22. Torres F.G., Carrillo M. i Cubillas M.L. Plotnost' rasplava polimernyh poroshkov, napolnennyh natural'nymi voloknami. *Polym Polym Compos* 2006; 14: 691-700.
23. Liu G., Park C.B. i Lefas J.A. Proizvodstvo penoplastov nizkoj plotnosti iz LLDPE pri rotacionnom formovanii. *Polym Eng Sci* 1998; 38: 1997-2009.
24. Aleksander Hejna. Kafedra tekhnologii polimerov, Gdan'skij tekhnologicheskij universitet, Narutovicha, 11/12, 80-233 Gdan'sk, Pol'sha. Vrashchatel'noe formovanie linejnyh kompozitov iz polietilena nizkoj plotnosti s napolnitelem iz pshenichnyh otrubej. <https://doi.org/10.3390/polym12051004>
25. Petar Antov. Strukturnoe primenenie ekologicheski chistyh kompozitov iz pererabotannyh drevesnyh volokon, skreplyonnyh lignosul'fonatom magniya. Kafedra mekhanicheskoy obrabotki drevesiny, fakul'tet lesnoj promyshlennosti, Universitet lesnogo hozyajstva, 1797 Sofiya, Bolgariya. 2020 Prikladnye nauki, 10(21), 7526; <https://doi.org/10.3390/app10217526>
26. Lumerka Del' V. Journal of Reinforced Plastics and Composites - aprel' 2020g. DOI: 10.1177/0731684420916529
27. Stamboulis A., Baillie C.A., Garkhil S.K., et al. Ekologicheskaya dolgovechnost' l'nyanyh volokon i ih kompozicij polipropilenovoj matricy. *Appl Compos Mater* 2000; 7: 273-294.
28. Thakur V.K., Thakur M.K. and Gupta R.K. Obzor: polimernye kompozity na osnove syryh natural'nyh volokon. *Int J Polym Anal Charact* 2014; 19: 256-271.
29. Bourai K., Riedl B. i Rodriguez D. Vliyanie temperatury na teploprovodnost' drevesno-plastikovyh kompozitov. *Polym Polym Compos* 2013; 21: 413-422.
30. Wang B., Panigrahi S., Tabil L., et al. Predvaritel'naya obrabotka l'nyanyh volokon dlya ispol'zovaniya v biokompozitah rotacionnogo formovaniya. *J Reinf Plast Compos* 2007; 26: 447-463.
31. Rahmat A.R. and Maradzi M.A. Mekhanicheskie svojstva polietilenovyh kompozitov, armirovannyh voloknami, poluchennyyh metodom rotacionnogo formovaniya pustyh fruktovyh grozdej. *J Chem Nat Res Eng* 2008; 2: 41-52.
32. Cisneros-Lo' pez E.O., Gonza' lez-Lopez M.E., Perez-Fonsoca A.A., et al. Vliyanie soderzhaniya volokon i obrabotki poverhnosti na mekhanicheskie svojstva kompozitov iz natural'nyh volokon, poluchennyyh metodom rotoformovaniya. *J Compos Interf* 2017; 24: 35-53
33. Hanana F.E., Yomeni C.D. i Rodriguez D. Morfologiya i mekhanicheskie svojstva armirovannogo klenom LLDPE, poluchennogo metodom rotacionnogo formovaniya: Vliyanie soderzhaniya volokon i obrabotki poverhnosti. *Polym Polym Compos* 2018; 26: 299-308.
34. Raymond A. i Rodriguez D. Penoplasty i drevesno-kompozitnye penoplasty, poluchennye rotoformovaniem. *Cell Polym* 2013; 32: 199-212.
35. Lopez-Ban~ uelos R.H., Robledo-Ort' Iz J.R., Ortega-Gudin or P., et al. Rotacionnoe formovanie kompozicionnyh materialov iz natural'nyh volokon i polietilena. In: *SPE Plastics Research Online*, 9 iyulya 2012 g., № 004326, str. 1-3.
36. Vazquez-Fletes R.C., Rosales-Rivera L..C, Moscoso- Sa'nchez F.J., et al. Poluchenie i harakteristika mnogoslojnogo vspenennogo kompozita metodom rotacionnogo formovaniya. *Polym Eng Sci* 2016; 56: 278-286.
37. Lignosul'fanat. Risunok 2. <https://studref.com/htm/img/40/8732/22.png>

**Information about the authors:**

**Tyukanko V.Y.** - High researcher, Department of Chemistry and Chemical Technologies, PhD, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [vyutyuukan@ku.edu.kz](mailto:vyutyuukan@ku.edu.kz);

**Tarunin R.A.** - Master's Degree, Department of International Campus, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [ratarunin@ku.edu.kz](mailto:ratarunin@ku.edu.kz);

**Akanova M.D.** – Senior Lecturer, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Master's Degree, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [meiramgul-87@mail.ru](mailto:meiramgul-87@mail.ru);

**Serikbol N.** – corresponding author, student, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [nursaule2018008@mail.ru](mailto:nursaule2018008@mail.ru);

**Nurmazanova A.A.** – student, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [nurmazzzanova@gmail.com](mailto:nurmazzzanova@gmail.com);

**Qairatuly R.** – student, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [rkayratly@bk.ru](mailto:rkayratly@bk.ru);

**Alpysov R.R.** – master's student, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [sparkggvpeasy27@gmail.com](mailto:sparkggvpeasy27@gmail.com);

**Kusainov A.G.** – master's student, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [alisher2909@gmail.com](mailto:alisher2909@gmail.com);

**Krasilnikov R.E.** – master's student, Department of Chemistry and Chemical Technologies, Kozybayev University, Petrolpavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [ypravdom01@gmail.com](mailto:ypravdom01@gmail.com).