

Сведения об авторах

Назым Аблайкызы Алдабергенова* – магистрант образовательной программы «Технология продуктов питания», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: nosyadem@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8399-6998>.

Амиржан Леонидович Касенов – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств», Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан; e-mail: a.kassenov@kazatu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7715-1128>.

Information about the authors

Nazym Aldabergenova* – PhD student of the «Food Technology» educational program, S. Seifullin Kazakh Agro-Technical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nosyadem@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8399-6998>.

Amirjan Kassenov – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of «Technology of Food and Processing Industries», S. Seifullin Kazakh Agro-Technical Research University, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.kassenov@kazatu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7715-1128>.

Редакцияға енуі 10.02.2025

Өңдеуден кейін түсуі 17.02.2025

Жариялауға қабылданды 18.02.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-28](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-28)



MPHTI: 65.01.90; 65.39.33

Г.Х. Оспанкулова¹, М. Мұратхан², В. Ли³, Е.П. Евлампиева², Е.Е. Ермаков^{1*}

¹Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, 010000, Республика Казахстан, г. Астана, Женис, 62

²Университет имени Шакарима города Семей,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глиники, 20 А

³Северозападный университет сельского и лесного хозяйства 050040, Китайская Народная Республика, г. Янлин, пр. Тайчен, 3

*e-mail: yernazyermekov@outlook.com

БИОРАЗЛОЖЕНИЕ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПИЩЕВЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПОЛИКАПРОЛАКТОНА И МОДИФИЦИРОВАННОГО КРАХМАЛА

Аннотация: Проблема загрязнения окружающей среды пластиком приобрела глобальный характер, что делает разработку биоразлагаемых материалов крайне актуальной задачей. Традиционные пластиковые упаковки разлагаются сотни лет, вызывая накопление отходов в почве, воде и атмосфере. В данной работе исследуется процесс биоразложения пищевых пленок на основе поликапролактона (PCL) и модифицированного крахмала, а также их экотоксикологическое влияние. Экспериментально определены скорость разложения пленок в естественных условиях и в компосте, а также их устойчивость к воздействию микроорганизмов. Результаты показали, что биоразложение пленок напрямую зависит от содержания крахмала: чем выше его концентрация, тем быстрее пленка разлагается. В компостных условиях этот процесс идет значительно интенсивнее, чем в природной среде, что делает возможным их промышленную утилизацию. В то же время, высокая концентрация PCL замедляет биоразложение, но при этом повышает стабильность пленки. Экотоксикологические испытания подтвердили, что продукты разложения пленок не оказывают вредного влияния на почвенные микроорганизмы. Это делает их перспективным решением для создания экологически безопасной пищевой упаковки. Полученные результаты демонстрируют возможность широкого применения PCL-крахмальных композитов, а также необходимость дальнейших исследований по оптимизации их состава. Внедрение таких материалов в промышленное производство позволит снизить нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: биоразлагаемые пленки, крахмал, поликапролактон (PCL), механическая прочность, биоразложение, микробиологическая устойчивость.

Введение

На современном этапе развития синтетические пластики остаются доминирующим материалом благодаря их низкой стоимости, универсальности и высоким эксплуатационным характеристикам, таким как прочность, химическая устойчивость и лёгкость обработки [1]. Однако их экологическая устойчивость, достигающая сотен лет, превратилась в глобальную угрозу. По данным ОЭСР, ежегодно в мире образуется более 400 млн тонн пластиковых отходов, из которых лишь 9% перерабатывается, 19% сжигается, а остальные 72% накапливаются на полигонах, в водных экосистемах и почвах [2]. Пластиковое загрязнение затрагивает все экосистемы: от глубоководных желобов Марианской впадины до арктических льдов, где микропластик обнаруживается в концентрациях до 12 000 частиц на литр льда [3].

Согласно стандартам ЕС, биоразлагаемый пластик должен в течение 6 (или 9) месяцев после компостирования разложиться на углекислый газ, воду и гумус. Эти вещества не должны содержать более 10% частиц размером более 2 мм [4]. Биоразложение композиций PCL-крахмал начинается с потребления крахмала и непрерывно увеличивается с увеличением содержания в натуральном наполнителе. Мониторинг толщины образца оказался полезным для измерения поверхностной эрозии и дополнением к сканирующей электронной микроскопии [5]. Другая возможность состоит в том, что количество образовавшейся двуокиси углерода, полученной в результате биоразложения исследуемого материала, можно измерить, сравнить с теоретическим максимальным количеством и записать как процент биоразложения [6]. Смесь пшеничного крахмала / алифатического полиэфира, исследованная Lim и др. [7] продемонстрировали отличную биоразлагаемость. Испытания на заложение в почве показали полное биоразложение в течение восьми недель. Bastioli и др. (1995) [8] сообщили об усилении биодеградации PCL в присутствии крахмала за счет увеличения площади поверхности для микробной атаки. Компост, полученный из биоразлагаемых пластиков вместе с другими органическими продуктами, увеличивает содержание органического углерода в почве, удерживает воду и питательные вещества, одновременно сокращая внесение удобрений и подавляя болезни растений. При компостировании биоразлагаемых пластиков также происходит переработка веществ, а не их «фиксация» в стойких материалах, особенно когда неразлагаемые пластики отправляются на свалку [9].

Rivard и др. [10] изучали анаэробное разложение ацетилованных крахмалов с DS в диапазоне от 0,3 до 2,4 в течение 98-дневного инкубационного периода. Авторы сообщили о резком снижении уровней деградации для образцов с уровнями DS от 1,2 до 1,7. При DS выше 1,7 ацетилованные крахмалы не поддаются биологическому разложению [10]. Устойчивость ацетилованных крахмалов к разложению может быть результатом плохого смачивания и, следовательно, ограниченного контакта микробов с поверхностью полимера в результате повышенной гидрофобности ацетилованных крахмалов или стерических затруднений со стороны присоединенных функциональных групп, которые препятствуют биоцидной активности.

Инновации, такие как ферментативная деградация пластика с помощью бактерий *Ideonella sakaiensis*, пока неэффективны в промышленных масштабах из-за низкой скорости разложения [11]. Биопластики на основе полимолочной кислоты (PLA) требуют специализированных компостеров, которых недостаточно даже в развитых странах [12-14]. Альтернативы, такие как упаковка из водорослей или мицелия, сталкиваются с проблемами масштабирования и конкуренцией с традиционными материалами по цене [15-18].

В ходе предыдущих исследований была разработана и оптимизирована технология получения биоразлагаемых пленок на основе ацетилованного крахмала и PCL. Оптимизация степени ацетилирования (DS) и составов композитов на их основе позволила добиться баланса между механической прочностью пленки и ее биоразлагаемостью, что является ключевым фактором для создания экологически безопасных упаковочных материалов.

Целью настоящей работы является оценка свойств разложения полученных пленочных материалов, а также их экотоксикологического воздействия.

Методы исследования

Исследованы пленки с составами: чистый PCL, PCL с добавлением 30% пшеничного А крахмала, PCL с добавлением 40% пшеничного А крахмала, PCL с добавлением 50% пшеничного А крахмала, PCL с добавлением 30% пшеничного В крахмала, PCL с

добавлением 40% пшеничного В крахмала, PCL с добавлением 50% пшеничного В крахмала. Пленки получали в пленочном экструдере из гранулированных в стренговом экструдере композитов с добавлением 10 процентов глицерина и 5 процентов карбоната кальция к сухой массе крахмала в экструдере.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) Микрофотографии были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа (JSM-6360LV, JEOL, Япония). Образец крахмала прикрепляли к стержню СЭМ с помощью двусторонней клейкой проводящей ленты, а напыление проводили золотом, чтобы сделать образец проводящим. Затем смонтированный образец помещали на предметный столик СЭМ, и изображения записывали в цифровом виде при ускоряющем напряжении 10 кВ.

Биоразложение в естественных условиях проводилось в соответствии российским стандартом ГОСТ 9.060-75 «Ткани. Метод лабораторных испытаний на устойчивость к микробиологическому разложению». Почвенный компост был приготовлен из конского навоза, садовой земли и песка, взятых в равных количествах по массе в соответствии с ГОСТ 9.060 – 75 с небольшими модификациями. Компост перед испытанием выдержан 2 месяца при $20 \pm 5^\circ\text{C}$. В период хранения компост ежедневно перемешивали и раз в неделю определяли влажность по ГОСТ 3816-61. Влажность почвы должна быть $30 \pm 5\%$. Запас почвы должен обеспечивать проведение испытаний в течение года и сохраняться при постоянных условиях, в деревянных ящиках. Условия проведения эксперимента: влажность естественной среды была 25% и влажность компостной среды была около 100%, без доступа света, температура естественной среды – 20°C , компостной среды – 26°C , pH естественной среды – 6,5, pH компостной среды – 5,5. Ящики с грунтом хранились в лаборатории.

Для исследования 1 г компоста в котором были деградированы пленки добавляли в 10 мл стерилизованной дистиллированной воды и встряхивали в течение 1 мин, затем выдерживали в течение получаса. Суспензию компоста последовательно разбавляли до коэффициента (10^{-3}) и по 100 мкл с каждого разведения использовали для посева в чашки с питательной средой. Засеянные чашки хранили при 37°C в инкубаторе (модель ЕС-20/60, ООО «Биосан», Латвия) в течение 24 ч. Подсчитывали колониеобразующие единицы бактерий [19]. Микробные популяции в образцах компоста рассчитывали (Колониеобразующая единица (сокр. КОЕ) на мл суспензии) по формуле (1).

$$\frac{\text{КОЕ}}{\text{мл}} = \frac{\text{Количество колоний на мл посева}}{\text{Общий коэффициент разбавления}} \quad (1)$$

где: КОЕ – колониобразующая единиц на мл суспензии.

Микроборезистентность композиционных культур определяли на агаризованных средах (табл. 1) в соответствии с ISO EN 846.

Таблица 1 – Оценка интенсивности биообрастания композиционных пленок культурами сапротрофных грибов

Степень развития сапротрофных грибов (баллы)	Оценка материала
0	Материал не является питательной средой, нейтрален, грибоустойчив. Роста не наблюдается
1	Рост грибов не заметен невооружённым глазом, однако следы роста отчетливо видны под микроскопом
2	Материал содержит питательные вещества, которые обеспечивают незначительное развитие грибов. Рост грибов локализуется в нескольких местах, охватывая в целом не более 25% поверхности образца
3	Рост спор распределен более или менее равномерно на многих участках, охватывая в целом не более 50% поверхности
4	Рост отчетливо виден невооруженным глазом и занимает более 50% поверхности. Материал содержит достаточное количество питательных веществ, которые благоприятствуют развитию грибов
5	Очень сильный рост грибов, мицелий покрывает всю поверхность материала

В эксперименте были использованы культуры плесневых сапротрофных грибов *Aspergillus niger*, *Penicillium pinophilum*, *Paecilomyces varioti*, *Trichoderma viride*, *Chaetomium globosum*, оценивали по интенсивности биообрастания композиционных пленок культурами сапротрофных грибов в соответствии с ГОСТ 28206-89.

Результаты исследований

Биоразложение – это процесс химического разложения материалов в естественной среде. Однако следует отметить, что тест при закапывании в почву больше, чем какие-либо другие тесты, отражает реальные условия [20]. Были использованы два метода биоразложения. Хорошо известно, что метод закапывания в почву в естественной среде является медленным процессом, в основном, из-за низкой скорости просачивания. Поэтому чтобы ускорить процесс широко в лабораторных условиях используется специальная среда – компост с регулируемыми режимами. Биоразлагаемость образцов продукта оценивали по потере веса с течением времени в естественной почвенной [21] и компостной среде. Пробы композиционных пленок выкапывали с интервалом из естественной среды каждые 10 дней, из компоста каждые 5 дней, промывали дистиллированной водой, сушили в течение 24 ч при комнатной температуре и взвешивали.

Через 10 дней после помещения композиционных образцов в естественные условия среды были зафиксированы первые показатели потери массы. Потеря массы композиционных образцов в почве в естественных условиях и почвенном компосте в лабораторных условиях представлены на рисунке 1.

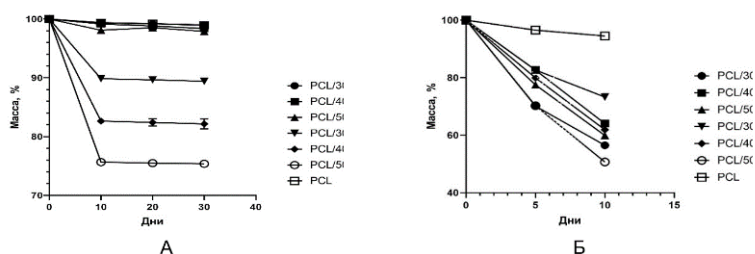


Рисунок 1 – Динамика потери массы композиционных пленок, заложенные в почву в естественных условиях и в компостной почвенной среде

А – биоразложение в естественной почвенной среде, Б – биоразложение в компостной почвенной среде

В течение биоразложения визуально наблюдали за происходящими изменениями в композиционных пленках. Полученные данные сравнивали с контрольным образцом.

До закладки пленки с добавлением ацетилованного пшеничного крахмала типа А были прозрачными, с добавлением ацетилованного пшеничного крахмала типа В – имели прозрачно-желтый цвет, после биоразложения кроме пленок PCL все композиционные пленки помутнели, что связано с микробиологической атакой на углеводную составляющую пленки и выделение продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, однако структурная матрица пленки осталась незатронутой.

В лабораторных условиях в компостной среде после 10 дней половина композиционных пленок полностью разложилась, кроме PCL и композиционных пленок с содержанием ацетилованного пшеничного крахмала типа В

Из рисунка 1 хорошо видна динамика потери массы в естественной почвенной среде у следующих композиционных пленок: 70% PCL+30% ацетилованного крахмала типа В, 60% PCL+40% ацетилованного крахмала типа В, 50% PCL+50% ацетилованного крахмала типа В.

Все композиционные пленки в компостной среде с содержанием ацетилованного крахмала подвергались быстрому биоразложению в течение 10 дней. Биоразлагаемость на естественной почвенной среде была значительно слабее по сравнению с компостной средой.

Для оценки устойчивости проб композиционных пленок к микробиологическим штаммам проводили эксперимент с применением чистых культур почвенных плесневых грибов. В эксперименте были использованы культуры плесневых сапротрофных грибов *Aspergillus niger*, *Penicillium pinophilum*, *Paecilomyces varioti*, *Trichoderma viride*, *Chaetomium globosum*, в соответствии с ISO EN 846 на агаризованных средах с композиционными пленками. Инкубация сред проводилась при относительной влажности более 90% и

температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Длительность испытаний на резистентность в общем составлял 27 дней с периодическим контролем (рис. 2).

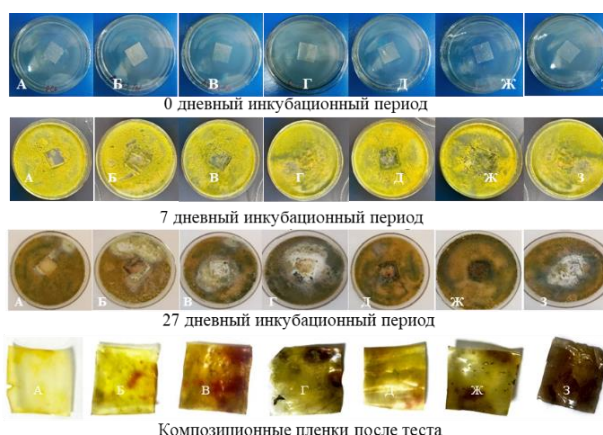


Рисунок 2 – Развитие почвенных плесневых грибов на композиционном полимере
А – PCL, Б – PCL/30%A, В – PCL/40%A, Г – PCL/50%A, Д – PCL/30%B, Ж – PCL/40%B, З – PCL/50%B

В таблице 2 представлены результаты экотоксикологических исследований экстрактов компоста, в которых были проведены исследования по биоразложению.

Таблица 2 – Количество колоний бактерий (КОЕ) из водного экстракта компоста, содержащего разные образцы

Образец пленки	Количество КОЕ/мл $\times 10^4$
PCL	$0,69 \pm 0,03^a$
PCL/A30%	$1,30 \pm 0,07^c$
PCL/A40%	$1,73 \pm 0,09^b$
PCL/A50%	$2,09 \pm 0,11^d$
PCL/B30%	$1,96 \pm 0,10^b$
PCL/B40%	$2,21 \pm 0,14^d$
PCL/B50%	$2,38 \pm 0,15^d$
Целлюлоза	Бактериальный газон
Контроль	$0,7 \pm 0,03^a$

$p < 0,05$; Среднее значение $\pm SD$ ($n = 3$). Значения в пределах одного столбца, имеющие разные буквы, значимо различаются между собой по критерию Дункана ($p < 0,05$).

Интенсивность роста плесневых грибов на композиционной пленке оценивали визуально по балльной шкале в зависимости степени развития культур на поверхности. Первое наблюдение проводилось на 7-ой день после засева культур, в начале инкубации наибольший активность проявила *Trioderma viride*, покрывая полностью поверхность чашки. После 14 дней наблюдался рост остальных сапротрофных грибов. В результате исследования на 27 сутки на чистом PCL без наполнителей рост сапротрофных грибов был локализован в нескольких местах, охватывая в целом не более 25% поверхности образца и оценка по балльной шкале – 2.

Интенсивность роста сапротрофных грибов первые 7 дней на композиционной пленке с 30-40% ацелированным пшеничным крахмальным наполнителем типа А был по балльной шкале равен – 4, т.е. рост грибов виден невооруженным глазом и занимал более 50% поверхности. Сильный рост был обнаружен на композиционной пленке с 50% ацелированным пшеничным крахмальным наполнителем типа А, по балльной шкале равен – 5, т.е. штаммы грибов покрывают всю поверхность материала.

Рост сапротрофных грибов на поверхности композиционных пленок с 30% ацелированным пшеничным В-крахмалом оценено по балльной шкале – 4, с увеличением с 40% в составе крахмала рост грибов охватывают всю поверхность композиционных пленок и оценен по балльной шкале – 5, это связано с маленьким размером гранул В крахмала, которые легко поддаются разрушению микроорганизмами и наличием белка, липидов, которые являются отличной питательной средой для грибов.

По истечении 27 дней на всех образцах, кроме роста *Trichoderma viride* наблюдаются рост остальных сапротрофных грибов, рост штаммов на поверхности PCL не активный, на том же уровне, что в первые 7 дней. Активность роста с 30-40% ацетилованным пшеничным крахмальным наполнителем типа А и В оценивается в 4 балла, по сравнению с 7 дневным ростом остался неизменным. А в остальных композиционных пленках невооруженным глазом виден активный рост всех видов сапротрофных грибов.

Обсуждение научных результатов

Исследования по устойчивости образцов пленок к микробиологическим штаммам показали, что композиционные пленки с увеличением концентрации крахмальных наполнителей более подвержены к микробиологическому разрушению. Однако, относительно устойчивыми к микроорганизмам были пленки с 30-40% ацетилованного пшеничного крахмала типа А и В, чем с 50%-ным крахмалом, что связано с приданием крахмалу гидрофобности при модификации.

Контроль – экстракт чистого компоста, целлюлоза. В холостом образце было обнаружено КОЕ $0,7 \times 10^4$, а целлюлоза полностью заросла микроорганизмами. Количество КОЕ было больше на всех образцах компоста, после биоразложения пленок, наполненных ацетилованным пшеничным А и В крахмалом с PCL, чем в контроле, что указывает на повышенный рост бактерий в образцах почвы. Следовательно, продукты биоразложения исследуемых пленок считаются нетоксичными.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили возможность использования природного и модифицированного пшеничного крахмала в качестве наполнителя для создания биоразлагаемых пленок на основе поликапролактона. Композиционные пленки с содержанием 30-40% ацетилованного крахмала обеспечили оптимальное сочетание механической прочности и скорости биоразложения, что делает их перспективными для применения в пищевой упаковке. Биоразложение в компостных условиях проходило значительно быстрее, чем в естественной почвенной среде, что свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения оптимальных условий для утилизации таких материалов. Результаты экотоксикологических исследований показали отсутствие токсичных эффектов, что подтверждает безопасность предложенных пленок для окружающей среды.

Список литературы

1. Rajendran R.C. Packaging applications of fungal mycelium-based biodegradable composites / R.C. Rajendran // Fungal Biopolymers and Biocomposites: Prospects and Avenues. – 2022. – P. 189-208.
2. OECD Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. – Paris: OECD Publishing, 2022.
3. Plastic pollution, waste management issues, and circular economy opportunities in rural communities / F.-C. Mihai et al // Sustainability. – 2021. – Т. 14, № 1. – P. 20.
4. European current standardization for plastic packaging recoverable through composting and biodegradation / M. Avella et al // Polymer testing. – 2001. – Т. 20, № 5. – P. 517-521.
5. Biodegradation of poly (ϵ -caprolactone)/starch blends and composites in composting and culture environments: the effect of compatibilization on the inherent biodegradability of the host polymer / R. Singh et al // Carbohydrate Research. – 2003. – Т. 338, № 17. – P. 1759-1769.
6. Biodegradation behaviors of thermoplastic starch (TPS) and thermoplastic dialdehyde starch (TPDAS) under controlled composting conditions / Y.-L. Du et al // Polymer Testing. – 2008. – Т. 27, № 8. – P. 924-930.
7. Structure and properties of biodegradable gluten/aliphatic polyester blends / S.W. Lim et al // European polymer journal. – 1999. – Т. 35, № 10. – P. 1875-1881.
8. Physical state and biodegradation behavior of starch-polycaprolactone systems / C. Bastioli et al // Journal of environmental polymer degradation. – 1995. – Т. 3. – P. 81-95.
9. Particle size and concentration of poly (ϵ -caprolactone) and adipate modified starch blend on mineralization in soils with differing textures / M. César et al // Polymer Testing. – 2009. – Т. 28, № 7. – P. 680-687.
10. Effects of natural polymer acetylation on the anaerobic bioconversion to methane and carbon dioxide / C. Rivard et al // Applied biochemistry and biotechnology. – 1992. – Т. 34. – P. 725-736.

11. Ideonella sakaiensis, PETase, and MHETase: From identification of microbial PET degradation to enzyme characterization / S. Yoshida et al // Methods in enzymology. – 2021. – Т. 648. – P. 187-205.
12. Fate of Biodegradable Polymers Under Industrial Conditions for Anaerobic Digestion and Aerobic Composting of Food Waste / F. Bandini et al // Journal of Polymers and the Environment. – 2020. – Т. 28. – P. 2539-2550.
13. Fogašová M. PLA/PHB-Based Materials Fully Biodegradable under Both Industrial and Home-Composting Conditions / M. Fogašová, S. Figalla, L. Danišová // Polymers. – 2022. – Т. 14.
14. Enhancing the biodegradation rate of poly(lactic acid) films and PLA bio-nanocomposites in simulated composting through bioaugmentation / E. Castro-Aguirre et al // Polymer Degradation and Stability. – 2018.
15. Challenges and Opportunities in Scaling up Architectural Applications of Mycelium-Based Materials with Digital Fabrication / S. Bitting et al // Biomimetics. – 2022. – Т. 7.
16. Biofabrication of Nanocellulose–Mycelium Hybrid Materials / N. Attias et al // Advanced Sustainable Systems. – 2020. – Т. 5.
17. Algae-Based Biodegradable Eco-Friendly Food Packaging Design: A Case-Control Study with Thermoforming Process / L.R. Parada et al // DYNA. – 2023.
18. Algal cellulose, production and potential use in plastics: Challenges and opportunities / E. Zanchetta et al // Algal Research. – 2021.
19. Preparation and characterization of polypropylene/polylactide blends and nanocomposites and their biodegradation study / D.K. Mandal et al // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2021. – Т. 34, № 6. – P. 725-744.
20. Preparation and study of novel biodegradable blends based on gelatinized starch and 1, 4-trans-polyisoprene (gutta percha) for food packaging or biomedical applications / I. Arvanitoyannis et al // Carbohydrate Polymers. – 1997. – Т. 34, № 4. – P. 291-302.
21. Wu C.-S. Physical properties and biodegradability of maleated-polycaprolactone/starch composite / C.-S. Wu // Polymer degradation and stability. – 2003. – Т. 80, № 1. – P. 127-134.

Информация о финансировании

Данное исследование было профинансировано Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан BR22883587 «Совершенствование и разработка наукоемких технологий глубокой переработки сельскохозяйственного сырья для укрепления продовольственной безопасности РК».

Г.Х. Оспанкулова¹, М. Мұратхан², В. Ли³, Е.П. Евлампиева², Е.Е. Ермаков^{1*}

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
010000, Қазақстан Республикасы, Астана қаласы, Жеңіс даңғылы, 62

²Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинка көшесі, 20 А

³Солтүстік-Батыс ауыл және орман шаруашылығы университеті,
050040, Қытай Халық Республикасы, Янлин қаласы, Тайчен даңғылы, 3

*e-mail: yernazyermekov@outlook.com

ПОЛИКАПРОЛАКТОН ЖӘНЕ МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН КРАХМАЛ НЕГІЗІНДЕГІ ТАҒАМДЫҚ ПЛЕНКАЛАРДЫҢ БИОЫДЫРАУЫ ЖӘНЕ ЭКОТОКСИКОЛОГИЯЛЫҚ БАҒАЛАУЫ

Қазіргі таңда пластикалық қалдықтардың жиналуына байланысты биоыдырайтын материалдарды әзірлеу маңызды мәселелердің бірі болып табылады. Полимерлердің қоршаған ортада ұзақ уақыт сақталуы экожүйелерге теріс әсерін тигізіп, топырақ пен су ресурстарын ластайды. Бұл зерттеу поликапролактон (PCL) және модификацияланған крахмал негізінде жасалған биоыдырайтын тағамдық пленкалардың ыдырау процесін және олардың экологиялық қауіпсіздігін бағалауға бағытталған. Зерттеу барысында пленкалардың табиғи ортада және компост жағдайында биоыдырау жылдамдығы, олардың микроорганизмдерге төзімділігі зерттелді. Нәтижелер пленкалардың биоыдырауы олардың құрамындағы крахмал мөлшеріне байланысты екенін көрсетті. Крахмалдың концентрациясы артқан сайын пленкалардың ыдырауы жылдамдайды, ал PCL мөлшері көп болған жағдайда ыдырау баяу жүреді. Бұл пленкалардың табиғи ортаға бейімделуін күшейтіп, олардың қоршаған ортада қауіпсіз ыдырауын қамтамасыз етеді. Компост жағдайында пленкалардың ыдырауы табиғи ортаға қарағанда бірнеше есе жылдам жүрді.

Экотоксикологиялық зерттеулер пленкалардың құрамында топырақ микроорганизмдерінің белсенділігіне теріс әсер ететін компоненттердің жоқ екенін дәлелдеді. Бұл биоыдырайтын пленкалардың қоршаған ортаға зиянсыз екенін көрсетеді. Зерттеу нәтижелері PCL және модификацияланған крахмал негізіндегі пленкаларды экологиялық таза тағамдық орау материалдарын әзірлеуде қолдануға болатынын растайды. Бұл материалдардың болашағы зор және оларды өнеркәсіптік масштабта пайдалану экологиялық қауіпсіздікке оң әсер етеді.

Түйін сөздер: Биоыдырайтын пленкалар, крахмал, поликапролактон (PCL), механикалық беріктік, биоыдырау, микробиологиялық төзімділік.

G.Kh. Ospankulova¹, M. Murtkhan², W. Li³, Y.P. Yevlampiyeva², Y.Y. Yermekov^{1*}

¹S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Zhenis Avenue, 62

²Shakarim University of Semey,
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki Street, 20A

³Northwest A&F University,
050040, People's Republic of China, Yangling, Taichen Road, 3

*e-mail: yernazyermekov@outlook.com

BIODEGRADATION AND ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF FOOD FILMS BASED ON POLYCAPROLACTONE AND MODIFIED STARCH

The global issue of plastic pollution necessitates the development of sustainable biodegradable materials. Traditional plastic packaging takes hundreds of years to degrade, accumulating in soil, water bodies, and ecosystems. This study investigates the biodegradation process of food films based on polycaprolactone (PCL) and modified starch, as well as their environmental impact. The degradation rate of these films was analyzed under natural and composting conditions, along with their resistance to microbial exposure. The results demonstrated that biodegradation is directly influenced by starch content: higher concentrations led to faster degradation, making the films more adaptable to natural environmental cycles. In composting environments, decomposition occurred at a significantly accelerated rate compared to natural soil conditions, suggesting their potential for industrial composting. However, a higher PCL content slowed down biodegradation while increasing film stability. Ecotoxicological studies confirmed that the degradation products of these films did not negatively affect soil microbial activity, indicating their environmental safety. These findings highlight the potential of PCL-starch composites as eco-friendly packaging solutions. The study underscores the necessity for further optimization of biodegradable film formulations to enhance their performance in different environmental settings. Implementing these materials in commercial packaging could significantly reduce plastic waste and environmental pollution.

Key words: biodegradable films, starch, polycaprolactone (PCL), mechanical strength, biodegradation, microbiological resistance.

Сведения об авторах

Гульназым Хамитовна Оспанкулова – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры «Технологии пищевых и перерабатывающих производств»; Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина; e-mail: bulashevag@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6043-4658>.

Марат Мұратхан – докторант кафедры «Пищевая технология», Университет имени Шакарима города Семей; e-mail: marat@nwafu.edu.cn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5428-0822>.

Венхао Ли – PhD, и.о. ассоциированного профессора факультета пищевой технологии и инженерии Северозападного университета сельского и лесного хозяйства, KHP, e-mail: liwenhao@nwsuaf.edu.cn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5031-8717>.

Елена Петровна Евлампиева – кандидат биологических наук, координатор Центра организации научных исследований, Университет имени Шакарима города Семей; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-3686>.

Ерназ Ермакович Ермаков* – докторант кафедры «Технология пищевых и перерабатывающих производств»; Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, город Астана, Республика Казахстан; e-mail: yernazyermekov@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1441-9796>.

Авторлар туралы мәліметтер

Гульназым Хамитовна Оспанкулова – биология ғылымдарының кандидаты, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістері технологиясы» кафедрасының аға оқытушысы, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті; e-mail: bulashevag@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6043-4658>.

Марат Мұратхан – Семей қаласының Шәкәрім атындағы университетінің «Тамақ технологиясы» кафедрасының докторанты; e-mail: marat@nwafu.edu.cn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5428-0822>.

Венхао Ли – PhD, Қытайдың Солтүстік-Батыс ауыл және орман шаруашылығы университетінің тамақ технологиясы және инженерия факультетінің қауымдастырылған профессор м.а.; e-mail: liwenhao@nwsuaf.edu.cn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5031-8717>.

Елена Петровна Евлампиева – биология ғылымдарының кандидаты, Ғылыми зерттеулерді ұйымдастыру орталығының координаторы, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-3686>.

Ерназ Ермекович Ермеков* – докторант, «Тамақ және қайта өңдеу өндірістері технологиясы» кафедрасы, С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қаласы; e-mail: yernazyermekov@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1441-9796>.

Information about the authors

Gulnazym Khamitovna Ospankulova – Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer at the Department of «Food and Processing Technologies», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University; e-mail: bulashevag@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6043-4658>.

Marat Muratkhan – Doctoral student at the Department of «Food Technology», Shakarim University; e-mail: marat@nwafu.edu.cn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5428-0822>.

Wenhao Li – PhD, Acting Associate Professor at the Faculty of Food Technology and Engineering, Northwest A&F University, PR China; e-mail: liwenhao@nwsuaf.edu.cn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5031-8717>.

Yelena Petrovna Yevlampiyeva – Candidate of Biological Sciences, Coordinator of the Research Organization Center, Shakarim University; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-3686>.

Yernaz Yermekovich Yermekov* – Doctoral student at the Department of «Food and Processing Technologies», S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana; e-mail: yernazyermekov@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1441-9796>.

Поступила в редакцию 14.02.2025

Поступила после доработки 03.03.2025

Принята к публикации 06.03.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1\(17\)-29](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-1(17)-29)

FTAXP: 65.59.29



Г.Е. Исламова*, А. А. Утебаева, А.Р. Тасполтаева, А.У. Шингисов

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан зерттеу университеті,

Қазақстан Республикасы, Шымкент, Тәуке хан даңғылы, 5

*e-mail: Gulnura_87_KZ@mail.ru

ЕТ КОМПЛЕКТТЕРІНІҢ ЖАҢА ТҮРІН ЖАСАУ ЖӘНЕ ӨНІМНІҢ ФУНКЦИОНАЛДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа: Ет жартылай фабрикаларының құрамын өсімдік қоспаларымен толықтыру арқылы шикізаттың бір бөлігін алмастыру рецептураларын әзірлеу – ет өнімдерінің қолжетімділігін арттыру, олардың ассортиментін кеңейту және функционалдық қасиеттерін жақсарту мәселелерін шешудің перспективалы жолы болып табылады. Бұл жұмыста қызанақтың тағамдық және биологиялық құндылығын арттыру мақсатында қызанақты қайта өңдеуден кейінгі екіншілік өнімі – қызанақ сығындысымен байытылған ет комплекттерін әзірлеу қарастырылды. Зерттеу барысы байытылған өнімнің органолептикалық, физикалық-химиялық, биохимиялық және микробиологиялық сипаттамаларын бағалауға бағытталған. Рецепттурадағы қызанақ сығындысының оңтайлы мөлшерін анықтау жүргізілді, сонымен қатар оның комплекттердің дәміне, құрылымына және хош иісті қасиеттеріне әсері зерттелді. 3% қызанақ сығындысын қосу өнімнің құрылымы мен дәміне теріс әсер етпестен сенсорлық сипаттамаларын жақсартатындығы анықталды. Сонымен қатар, өсімдік компонентінің өнімдегі липидтердің тұрақтылығына оң әсері расталды. Алынған нәтижелер тағамдық құндылығы мен экологиялық тұрақтылығы жоғары функционалды жартылай ет өнімдерін жасау үшін пайдаланылуы мүмкін. Ет өнеркәсібінде