

**Г.Х. Оспанкулова<sup>1</sup>, М. Мұратхан<sup>2</sup>, В. Ли<sup>3</sup>, А.М. Байкадамова<sup>2</sup>, Е.Е. Ермаков<sup>1\*</sup>**

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

<sup>2</sup>Университет имени Шакарима города Семей,

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

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

\*e-mail: yernazyermekov@outlook.com

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПШЕНИЧНОГО КРАХМАЛА И PCL**

**Аннотация:** Рост экологической осознанности и ужесточение регуляторных требований (например, директив ООН по устойчивому развитию) стимулируют переход от традиционных пластиков к биоразлагаемым аналогам. В пищевой промышленности такие материалы особенно востребованы для производства упаковочных пленок, которые должны сочетать функциональность, безопасность и способность к деградации в природных условиях. Современные тенденции в области разработки биоразлагаемой упаковки ориентированы на создание экологически безопасных материалов с высокой функциональностью и экономической эффективностью. Особый интерес представляют смеси поликапролактона (PCL) и крахмала, которые способны сочетать биоразлагаемость с необходимыми механическими и барьерными свойствами. В данной работе исследуется влияние состава крахмал-PCL-компози́тов на их механические характеристики, а также предложена математическая модель для прогнозирования прочности пленок на основе различных параметров состава. Экспериментальные исследования включали приготовление гранул и пленок с использованием экструзии и последующее определение прочностных характеристик. Применение математического моделирования позволило выявить оптимальные составы пленок, обеспечивающие требуемый баланс прочности, гибкости и биоразлагаемости. Полученные результаты подтверждают перспективность использования смесей PCL и крахмала в качестве альтернативы традиционным пластиковым упаковочным материалам, а разработанная модель может быть полезна для дальнейшего совершенствования технологий производства биоразлагаемых пленок.

**Ключевые слова:** биоразлагаемая упаковка, поликапролактон, крахмал, композитные пленки, механические свойства, математическое моделирование.

### **Введение**

Современные исследования в области биоразлагаемой упаковки фокусируются на разработке материалов, сочетающих экологичность, функциональность и экономическую целесообразность. Основное внимание уделяется полисахаридам (крахмал, целлюлоза, хитозан, альгинат), которые модифицируются химически, физически либо добавлением наночастиц или природными добавками для улучшения барьерных и механических свойств [1-4]. Особую значимость имеют крахмалы, благодаря их доступности, полной биоразлагаемости и способности формировать плёнки с заданными свойствами. Например, композиты содержащие крахмал демонстрируют снижение влагопоглощения и повышение прочности, что делает их перспективными для упаковки пищевых продуктов [1, 5]. Полиэфиры, такие как полилактид (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA) и поликапролактон (PCL), активно исследуются благодаря их биоразлагаемости. PCL, в частности, отличается высокой эластичностью и медленной деградацией, что расширяет его применение в упаковке [6, 7].

Рост экологической осознанности и ужесточение регуляторных требований (например, директив ООН по устойчивому развитию) стимулируют переход от традиционных пластиков к биоразлагаемым аналогам. В пищевой промышленности такие материалы особенно востребованы для производства упаковочных пленок, которые должны сочетать функциональность, безопасность и способность к деградации в природных условиях [8-11].

Среди ключевых биоразлагаемых полимеров выделяются поликапролактон (PCL), полилактид (PLA), полигидроксibuтират (PHB) и крахмалосодержащие композиты [12-16].

PCL – синтетический полиэфир, получаемый путем полимеризации  $\epsilon$ -капролактона. Он отличается высокой эластичностью, низкой температурой плавления ( $60^{\circ}\text{C}$ ) и медленной скоростью разложения (2-4 года) [17]. Благодаря гибкости PCL часто комбинируют с хрупкими полимерами, такими как PLA, для улучшения механических свойств пленок. Исследования показывают, что пленки на основе PCL обеспечивают хорошую барьерную защиту от влаги, но ограничены в термостойкости [18]. В пищевой упаковке PCL используют в композитах для производства биоразлагаемых пакетов и покрытий [19].

Один из первых всплесков интереса к PCL произошел, когда было обнаружено, что материалы PCL могут быть полностью разложены бактериальными и грибковыми ферментами, что делает его особенно интересным при применении биоразлагаемых материалов. Помимо ожидаемой деградации эстеразами, имеется много доказательств того, что PCL подвержен ферментативной деградации липазами [20]. Однако цена PCL слишком высока для использования в качестве обычного пластика. Многие исследователи ожидают, что, PCL/крахмал может понизить стоимость биопластика [21, 22]. Одна из основных проблем, количественное содержание крахмала в общем композите ниже 40 мас. %, все еще присутствует. Чтобы получить термопластичные биоразлагаемые пластмассы с низкой ценой, Sun и др. исследователи сначала изготовили этерифицированный крахмал с высоким DS на основе стеарилхлорида и нативного крахмала. Затем биопластик был приготовлен смешиванием в расплаве этерифицированного крахмала (80 мас. %) и PCL (20%). Во время смешивания в расплаве было обнаружено, что момент силы смеси PCL/этерифицированный крахмал был значительно ниже, чем у PCL/нативный крахмал без какого-либо пластификатора, и дополнительно уменьшался с увеличением DS. Композиты PCL/этерифицированный крахмал проявляли более высокую упругость при растяжении чем композиты PCL/нативный крахмал [23].

В исследованиях [23, 24] биоразлагаемые полиэфиры, такие как поли-капролактон (PCL), были функционализированы полярными группами, такими как эпоксид или ангидрид, способные положительно взаимодействовать с гидроксильными группами цепей крахмала, оказывая положительное влияние на совместимость полимера. Эти соединения, таким образом, действуют как связывающие агенты между обоими материалами, улучшая их совместимость из-за их амфифильной природы [25].

Дополнительные исследования смесей крахмала и поли( $\epsilon$ -капролактона) (PCL) необходимы для оптимизации их свойств и расширения их применения в упаковочной промышленности. Создание композитных пленок на основе этих материалов позволит объединить биоразлагаемость и механическую прочность, что особенно важно для разработки устойчивых альтернатив традиционным пластиковым упаковкам. Важным направлением исследований является не только экспериментальное изучение структурных и физико-механических характеристик данных материалов, но и разработка математических моделей, которые смогут предсказать их поведение при различных условиях эксплуатации. Такие модели позволят анализировать влияние состава, молекулярной массы компонентов, степени кристалличности и процессов модификации на механические и барьерные свойства получаемых пленок, что существенно ускорит процесс создания новых, более эффективных биоразлагаемых упаковочных материалов.

#### **Методы исследования**

Приготовление биоразлагаемых гранул и пленки, оптимизация состава

Планирование эксперимента и построения модели математического прогнозирования прочностных характеристик основана на полном факторном эксперименте (ПФЭ)  $3^3$ , что соответствует трем факторам, каждый из которых варьируется на трех уровнях. Выбор данной методики обоснован необходимостью количественной оценки влияния состава смеси на прочность на разрыв (МПа), что требует системного подхода к изменению независимых переменных и их математическому моделированию. Фактор X – содержание пшеничного А крахмала (%), фактор Y – содержание глицерина (%), фактор Z – содержание карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ , %) исследуется влияние этих трех факторов на выходную переменную – прочность на разрыв (МПа). Матрица эксперимента и трехфакторный план един для композиции с обоими типами крахмалов.

Экструзия крахмала состоит из трех этапов, желатинизации, плавления и По данным научно-технической литературы температурный профиль получения пленки из чистого поликапролактона на фазе формирования рукава должны быть не выше 100°C, таковой же она является для получения пленок на основе смеси поликапролактана и термопластичного крахмала [22]. В наших исследованиях температурными режимами экструзии избраны 70 °C /90 °C /100 °C /70 °C /60 °C, на основании температуры плавления основного сополимера PCL, для вытягивания начального рукава использовали полиэтилен постепенно замещая пеллеты LDPE опытными гранулами

Изучение деформационно-прочностных свойств пленок проводили по ГОСТ 11262-2017 Пластмассы. Метод испытания на растяжение.

Определение оптимальных составов получения гранул и пленки проводили вкупе с определением механических свойств получаемых пленок, так как именно механические свойства пленок играют ключевую роль в экономической и практической жизнеспособности гранул, а также пленок, полученных на их основе.

Для изучения влияния состава смеси на прочность использован трехфакторный план эксперимента (3<sup>3</sup>-план). Факторы и уровни их варьирования с кодированными значениями представлены в таблице 1. Фактор x – содержание пшеничного А или В крахмала (%); y – содержание глицерина (%); z – содержание карбоната кальция (CaCO<sub>3</sub>, %) исследуется влияние этих трех факторов на выходную переменную – прочность на разрыв (МПа). Матрица эксперимента едина для композиции с обоими типами крахмалов

Таблица 1 – Факторы и уровни их варьирования

| Факторы             |           | Уровни вариации |     |    | Интервал вариации |
|---------------------|-----------|-----------------|-----|----|-------------------|
| Критерий            | Кодировка | -1              | 0   | +1 |                   |
| Крахмал, %          | X         | 20              | 40  | 60 | 20                |
| Глицерин, %         | Y         | 5               | 10  | 15 | 5                 |
| Карбонат кальция, % | Z         | 2               | 3,5 | 5  | 1,5               |

Полученные гранулы и пленки представлены на рисунках 1, 2.



Рисунок 1 – Гранулы полученные из ацелированного А (слева) и В крахмала (справа)



Рисунок 2 – Выдувание пленки в пленочном экструдере

### Результаты исследований

В таблице 2 приведена матрица эксперимента со всеми возможными сочетаниями факторов трехфакторного плана эксперимента в кодированном и натуральном значении и измеренными значениями прочности на разрыв по экспериментам с пшеничным крахмалом А.

Таблица 2 – Опытные составы композиционных смесей с пшеничным В крахмалом используемых для математического моделирования прочностно деформационных свойств в зависимости от состава смесей

| №  | Кодированные значения |    |    | Натуральные значения   |             |                       | Прочность на разрыв, МПа эмпирические данные |
|----|-----------------------|----|----|------------------------|-------------|-----------------------|----------------------------------------------|
|    | x                     | y  | z  | Пшеничный В крахмал, % | Глицерин, % | CaCO <sub>3</sub> , % |                                              |
| 1  | 1                     | 1  | 1  | 60                     | 15          | 5                     | 28,5000±0,12                                 |
| 2  | 0                     | 1  | 1  | 40                     | 15          | 5                     | 32,3000±0,10                                 |
| 3  | -1                    | 1  | 1  | 20                     | 15          | 5                     | 34,4000±0,14                                 |
| 4  | 1                     | 0  | 1  | 60                     | 10          | 5                     | 25,0000±0,21                                 |
| 5  | 0                     | 0  | 1  | 40                     | 10          | 5                     | 28,9500±0,12                                 |
| 6  | -1                    | 0  | 1  | 20                     | 10          | 5                     | 35,2000±0,33                                 |
| 7  | 1                     | -1 | 1  | 60                     | 5           | 5                     | 20,5000±0,34                                 |
| 8  | 0                     | -1 | 1  | 40                     | 5           | 5                     | 26,4500±0,68                                 |
| 9  | -1                    | -1 | 1  | 20                     | 5           | 5                     | 32,7000±0,54                                 |
| 10 | 1                     | 1  | 0  | 60                     | 15          | 3,5                   | 14,2500±0,11                                 |
| 11 | 0                     | 1  | 0  | 40                     | 15          | 3,5                   | 18,2000±0,09                                 |
| 12 | -1                    | 1  | 0  | 20                     | 15          | 3,5                   | 24,4500±0,04                                 |
| 13 | 1                     | 0  | 0  | 60                     | 10          | 3,5                   | 12,7500±0,15                                 |
| 14 | 0                     | 0  | 0  | 40                     | 10          | 3,5                   | 16,7000±0,17                                 |
| 15 | -1                    | 0  | 0  | 20                     | 10          | 3,5                   | 22,9500±0,35                                 |
| 16 | 1                     | -1 | 0  | 60                     | 5           | 3,5                   | 10,2500±0,44                                 |
| 17 | 0                     | -1 | 0  | 40                     | 5           | 3,5                   | 14,2000±0,34                                 |
| 18 | -1                    | -1 | 0  | 20                     | 5           | 3,5                   | 20,4500±0,06                                 |
| 19 | 1                     | 1  | -1 | 60                     | 15          | 2                     | 1,5000±0,09                                  |
| 20 | 0                     | 1  | -1 | 40                     | 15          | 2                     | 5,4500±0,15                                  |
| 21 | -1                    | 1  | -1 | 20                     | 15          | 2                     | 11,7000±0,28                                 |
| 22 | 1                     | 0  | -1 | 60                     | 10          | 2                     | 1,2000±0,08                                  |
| 23 | 0                     | 0  | -1 | 40                     | 10          | 2                     | 3,9500±0,07                                  |
| 24 | -1                    | 0  | -1 | 20                     | 10          | 2                     | 2,0000±0,10                                  |
| 25 | 1                     | -1 | -1 | 60                     | 5           | 2                     | 2,2100±0,12                                  |
| 26 | 0                     | -1 | -1 | 40                     | 5           | 2                     | 1,4500±0,15                                  |
| 27 | -1                    | -1 | -1 | 20                     | 5           | 2                     | 0,8800±0,03                                  |

$p < 0,05$ ; Среднее значение  $\pm$  SD ( $n = 3$ ).

Модель множественной линейной регрессии предсказывает зависимую переменную прочность на разрыв (МПа) на основе трех независимых переменных: содержание В-крахмала (%), содержание глицерина (%) и содержание CaCO<sub>3</sub> (%). Уравнение регрессии представлено в формуле 1.

$$\text{Прочность на разрыв} = 10,687e^{i\pi} + (-0,190 * x) + (0,463 * y) + (8,654 * z) \quad (1)$$

Где:  $e$  – число Эйлера;  $i$  – мнимая единица;  $\pi$  – Пи;  $x$  – содержание В крахмала;  $y$  – содержание глицерина;  $z$  – содержание CaCO<sub>3</sub>

Модель построена на 27 наблюдениях. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0.968$ , что означает, что 96.8% изменчивости прочности на разрыв объясняется содержанием А-крахмала, глицерина и CaCO<sub>3</sub>. Скорректированное  $R^2$  равно 0.964, что свидетельствует о высокой надежности модели. Средняя ошибка оценки составляет 2.195, что указывает на небольшое среднее отклонение наблюдаемых значений от предсказанных. Оценка коэффициентов модели представлена в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка коэффициентов модели

| Переменная                       | Коэффициент | Стандартная ошибка | t-значение | P-значение | VIF   |
|----------------------------------|-------------|--------------------|------------|------------|-------|
| Константа                        | -10,687     | 1,943              | -5,500     | <0,001     | -     |
| Содержание А-крахмала (%)        | -0,190      | 0,0259             | -7,364     | <0,001     | 1,000 |
| Содержание глицерина (%)         | 0,463       | 0,103              | 4,474      | <0,001     | 1,000 |
| Содержание CaCO <sub>3</sub> (%) | 8,654       | 0,345              | 25,094     | <0,001     | 1,000 |

Каждая независимая переменная оказывает статистически значимое влияние на прочность на разрыв, так как все р-значения < 0.001. В частности содержание А-крахмала (%)

оказывает отрицательное влияние (коэффициент – 0,190), что означает, что при увеличении содержания А-крахмала прочность уменьшается. Содержание глицерина (%) оказывает положительное влияние (коэффициент 0.463), но его влияние менее выражено по сравнению с  $\text{CaCO}_3$ . Содержание  $\text{CaCO}_3$  (%) оказывает наиболее значительное положительное влияние (коэффициент 8.654), что указывает на его ключевую роль в повышении прочности. Все коэффициенты имеют  $\text{VIF} = 1.000$ , что подтверждает отсутствие мультиколлинеарности среди предикторов.

Таблица 4 – Дисперсионный анализ (ANOVA)

| Источник вариации | Степени свободы (DF) | Сумма квадратов (SS) | Средний квадрат (MS) | F-значение | P-значение |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------|------------|
| Регрессия         | 3                    | 3390,800             | 1130,267             | 234,656    | <0,001     |
| Остатки           | 23                   | 110,784              | 4,817                | -          | -          |
| Всего             | 26                   | 3501,584             | 134,676              | -          | -          |

Результаты дисперсионного анализа представленные в таблице 4 подтверждают, что регрессионная модель статистически значима ( $F = 234,656$ ,  $P < 0,001$ ), что означает, что независимые переменные в совокупности объясняют значительную долю изменчивости прочности на разрыв.

Остатки модели нормально распределены ( $P = 0.109$ ), что подтверждает корректность допущений линейной регрессии. Тест на гомоскедастичность ( $P = 0.787$ ) подтверждает, что остаточная дисперсия постоянна.

#### Обсуждение научных результатов

Предложенная модель множественной линейной регрессии является высокоточной и статистически значимой для предсказания прочности на разрыв (МПа) на основе содержания А-крахмала, глицерина и  $\text{CaCO}_3$ . Тесты на нормальность и гомоскедастичность пройдены, что подтверждает корректность модели.

Оптимальный состав смеси, обеспечивающий прочность в диапазоне от 15 до 30 соответствующему прочности LDPE и HDPE, содержание карбоната кальция составляет 5%, а глицерина около 10%. Такой состав позволяет достичь высокой прочности за счет максимального влияния  $\text{CaCO}_3$  и стабильного уровня глицерина, который обеспечивает улучшенную пластичность и механическую стойкость пленки.

С этими фиксированными параметрами математическая модель вписана в уравнение Лоренца для получения контурных графиков пар влияния пар влияния А крахмал – глицерин, карбонат – А крахмал которые представлены на рисунках 3, 4.

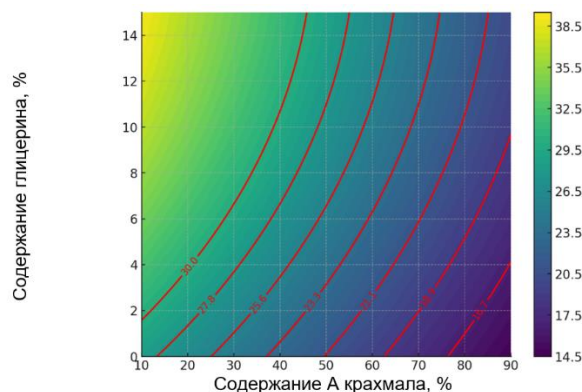


Рисунок 3 – Контурный график влияния пары глицерин – пшеничный А крахмал на прочность на разрыв получаемых пленок

Оптимальными композициями по прочностным характеристикам и предсказаниям модели отобраны: 50% PCL+50% ацетилованный А-крахмал (), 60% PCL+40% ацетилованный А-крахмал, 70% PCL+30% ацетилованный А-крахмал, во все образцы вносятся 10% глицерина, 5%  $\text{CaCO}_3$  к сухой массе крахмала.

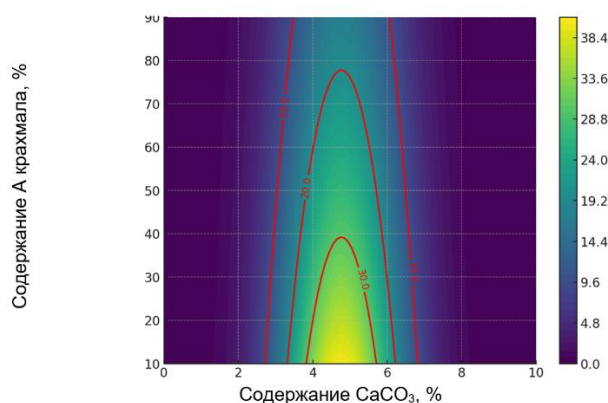


Рисунок 7 – Контурный график влияния пары глицерин - пшеничный А крахмал на прочность на разрыв получаемых пленок

Для подтверждения математической модели проведен подтверждающий эксперимент для сравнения предсказательной способности модели и эмпирических наблюдений. Данные подтверждающего эксперимента представлены в таблице 5. Данные подтверждающего эксперимента подтверждают состоятельность модели и ее предсказательные функции.

Таблица 5 – Данные подтверждающего эксперимента

| № | А Крахмал (%) | Глицерин (%) | CaCO <sub>3</sub> (%) | Фактическое значение (МПа) | Остаток регрессии (МПа) | Прогноз модели (МПа) |
|---|---------------|--------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------|
| 1 | 30            | 10           | 5                     | 30,02±0.13                 | 1,577                   | 31,597               |
| 2 | 40            | 10           | 5                     | 28,95±0.12                 | 0,677                   | 29,627               |
| 3 | 50            | 10           | 5                     | 25,14±0.22                 | 2,517                   | 27,657               |

$p < 0,05$ ; Среднее значение  $\pm SD$  ( $n = 3$ ).

### Заключение

Результаты проведенного исследования демонстрируют, что смеси крахмала и поликапролактона (PCL) обладают высоким потенциалом в качестве биоразлагаемых упаковочных материалов. Оптимизация состава композитов на основе крахмала и PCL позволила достичь значительного улучшения механических свойств пленок, включая повышение прочности и снижение влагопоглощения. Экспериментально подтверждено, что добавление глицерина и карбоната кальция способствует улучшению пластичности и механической стойкости полученных материалов. Разработанная математическая модель адекватно описывает поведение пленок при различных сочетаниях компонентов, что делает возможным целенаправленное проектирование композитов с заданными характеристиками. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение области применения полученных материалов, а также на совершенствование их технологии переработки с целью повышения экономической целесообразности производства. Использование таких биоразлагаемых пленок может стать важным шагом в снижении экологической нагрузки и переходе к более устойчивым упаковочным решениям.

### Список литературы

1. Bangar S.P. Nano-cellulose reinforced starch bio composite films-A review on green composites / S.P. Bangar, W.S. Whiteside // International journal of biological macromolecules. – 2021. – Т. 185. – P. 849-860.
2. Agar-Agar and Chitosan as Precursors in the Synthesis of Functional Film for Foods: A Review / C.R. Contessa et al // Macromol. – 2023. – Т. 3, № 2. – P. 275-289.
3. Extending the Postharvest Shelf Life of Strawberries Through a  $\kappa$ -Carrageenan/Starch-Based Coating Enriched with Zinc Oxide Nanoparticles / A.R. da Silva Bruni et al // ACS Food Science & Technology. – 2024. – Т. 4, № 12. – P. 2967-2979.
4. Agricultural waste-derived cellulose nanocrystals for sustainable active food packaging applications / T. Ghosh et al // Food Hydrocolloids. – 2024. – P. 110141.

5. Recent advances in starch–clay nanocomposites / G. Madhumitha et al // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. – 2018. – T. 23, № 4. – P. 331-345.
6. Utilization of lignin fractions in UV resistant lignin-PLA biocomposites via lignin-lactide grafting / S.Y. Park et al // International journal of biological macromolecules. – 2019. – T. 138. – P. 1029-1034.
7. Di Lorenzo M.L. Poly (l-lactic acid)/poly (butylene succinate) biobased biodegradable blends / M.L. Di Lorenzo // Polymer Reviews. – 2021. – T. 61, № 3. – P. 457-492.
8. Gupta V.M. A Comprehensive Review of Biodegradable Polymer-Based Films and Coatings and Their Food Packaging Applications / V.M. Gupta, D. Biswas, S. Roy // Materials. – 2022. – T. 15.
9. Rocha M. Biodegradable Films / M. Rocha, M.M. de Souza, C. Prentice // An Alternative Food Packaging. – 2018. – P. 307-342.
10. Calva-Estrada S.J. Protein-Based Films: Advances in the Development of Biomaterials Applicable to Food Packaging / S.J. Calva-Estrada, M. Jiménez-Fernández, E. Lugo-Cervantes // Food Engineering Reviews. – 2019. – T. 11. – P. 78-92.
11. Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review / P. Cazón et al // Food Hydrocolloids. – 2017. – T. 68. – P. 136-148.
12. Ramos M. Property Improvement of Polybutylene Succinate (PBS), Polyhydroxybutyrate (PHB), and Polylactic Acid (PLA) Films with PCL (Polycaprolactone) for Flexible Packaging Application / M. Ramos, S. Govindan, A. Al-Jumaily // Materials Science Forum. – 2023. – T. 1087. – P. 41-50.
13. Sydow Z. The overview on the use of natural fibers reinforced composites for food packaging / Z. Sydow, K. Bieńczyk // Journal of Natural Fibers. – 2019. – T. 16. – P. 1189-1200.
14. Environment-Friendly Biopolymers for Food Packaging / S.P.S. Aung et al // Protein, and Polylactic Acid (PLA). – 2018.
15. Development of Bio-Composites with Enhanced Antioxidant Activity Based on Poly(lactic acid) with Thymol, Carvacrol, Limonene, or Cinnamaldehyde for Active Food Packaging / M. Siddiqui et al // Polymers. – 2021. – T. 13.
16. (Bio)degradable polymers as a potential material for food packaging: studies on the (bio)degradation process of PLA/(R,S)-PHB rigid foils under industrial composting conditions / M. Musioł et al // European Food Research and Technology. – 2016. – T. 242. – P. 815-823.
17. Woodruff M.A. The return of a forgotten polymer—Polycaprolactone in the 21st century / M.A. Woodruff, D.W. Hutmacher // Progress in polymer science. – 2010. – T. 35, № 10. – P. 1217-1256.
18. Silvestre C. Food packaging based on polymer nanomaterials / C. Silvestre, D. Duraccio, S. Cimmino // Progress in polymer science. – 2011. – T. 36, № 12. – P. 1766-1782.
19. Gutiérrez T.J. In-depth study from gluten/PCL-based food packaging films obtained under reactive extrusion conditions using chrome octanoate as a potential food grade catalyst / T.J. Gutiérrez, J.R. Mendieta, R. Ortega-Toro // Food Hydrocolloids. – 2021. – T. 111. – P. 106255.
20. Enzymatic chain scission kinetics of poly ( $\epsilon$ -caprolactone) monolayers / A. Kulkarni et al // Langmuir. – 2007. – T. 23, № 24. – P. 12202-12207.
21. Processing and characterization of LDPE/starch/PCL blends / P. Matzinos et al // European Polymer Journal. – 2002. – T. 38, № 9. – P. 1713-1720.
22. Processing and characterization of starch/polycaprolactone products / P. Matzinos et al // Polymer Degradation and Stability. – 2002. – T. 77, № 1. – P. 17-24.
23. Preparation and properties of thermoplastic poly (caprolactone) composites containing high amount of esterified starch without plasticizer / Y. Sun et al // Carbohydrate polymers. – 2016. – T. 139. – P. 28-34.
24. Synthesis and Characterization of Functionalized Crosslinkable Poly ( $\epsilon$ -caprolactone) / P. Laurienzo et al // Macromolecular Chemistry and Physics. – 2006. – T. 207, № 20. – P. 1861-1869.
25. Reactive compatibilization of plant polysaccharides and biobased polymers: Review on current strategies, expectations and reality / B. Imre et al // Carbohydrate Polymers. – 2019. – T. 209. – P. 20-37.
26. Properties of starch after extrusion: A review / J. Ye et al // Starch-Stärke. – 2018. – T. 70, № 11-12. – P. 1700110.
27. Toughening PLA composites with natural fibers and enR / A. Shakoor et al // SPE Automotive Composites Conference & Exhibition at Troy, Michigan, USA from 11th to 13th September. – 2012.
28. The effect of temperature and pressure on polycaprolactone morphology / C. Baptista et al // Polymer. – 2020. – T. 191. – P. 122227.

## 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. Оспанкулова<sup>1</sup>, М. Мұратхан<sup>2</sup>, В. Ли<sup>3</sup>, А.М. Байкадамова<sup>2</sup>, Е.Е. Ермеков<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup>Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,  
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қаласы, Глинки көшесі, 20 А

<sup>3</sup>Солтүстік-Батыс ауыл және орман шаруашылығы университеті,  
050040, Қытай Халық Республикасы, Янлин қаласы, Тайчен даңғылы, 3  
e-mail: yernazyermekov@outlook.com

## БИДАЙ КРАХМАЛЫ МЕН PCL НЕГІЗІНДЕГІ ТАМАҚ ӨНЕРКӘСІБІНІҢ БИОЫДЫРАЙТЫН ПЛЕНКАЛАРЫНЫҢ БЕРІКТІК СИПАТТАМАЛАРЫН МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҮЛГІЛЕУ

Экологиялық сананың өсуі және реттеуші талаптардың (мысалы, БҰҰ-ның тұрақты даму жөніндегі директивалары) қатаңдатылуы дәстүрлі пластмассалардан биоыдырайтын баламаларға көшуді ынталандырады. Азық-түлік өнеркәсібінде мұндай материалдар, әсіресе, функционалдылықты, қауіпсіздікті және табиғи ортада ыдырау қабілетін біріктіретін орауыш қабықшаларды өндіру үшін аса қажет. Биоыдырайтын орауыштарды әзірлеу саласындағы қазіргі заманғы үрдістер экологиялық қауіпсіз, жоғары функционалды және экономикалық тұрғыдан тиімді материалдарды жасауға бағытталған. Айрықша қызығушылық поликапролактон (PCL) мен крахмал қоспаларына аударылады, себебі олар биоыдырау қабілетін қажетті механикалық және тосқауылдық қасиеттермен үйлестіруге мүмкіндік береді. Осы зерттеуде крахмал-PCL композиттерінің құрамының олардың механикалық қасиеттеріне әсері қарастырылады, сондай-ақ беріктікке әртүрлі құрам параметрлерінің әсерін болжау үшін математикалық модель ұсынылады. Эксперименттік зерттеулер экструзия әдісімен түйіршіктер мен қабықшаларды дайындауды және олардың беріктік сипаттамаларын анықтауды қамтыды. Математикалық модельдеуді қолдану арқылы беріктіктің, икемділіктің және биоыдыраудың қажетті теңгерімін қамтамасыз ететін қабықшалардың оңтайлы құрамдары анықталды. Алынған нәтижелер PCL мен крахмал қоспаларын дәстүрлі пластикалық орауыш материалдарға балама ретінде пайдалану мүмкіндігін растайды, ал әзірленген модель биоыдырайтын қабықшаларды өндіру технологияларын одан әрі жетілдіруге пайдалы болуы мүмкін.

**Түйін сөздер:** биоыдырайтын орау, поликапролактон, крахмал, композициялық пленкалар, механикалық қасиеттер, математикалық модельдеу.

G.Kh. Ospankulova<sup>1</sup>, M. Murtkhan<sup>2</sup>, W. Li<sup>3</sup>, A.M. Baikadamova<sup>2</sup>, Y.Y. Yermekov<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup>Shakarim University of Semey,  
071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Glinki Street, 20A

<sup>3</sup>Northwest A&F University,  
050040, People's Republic of China, Yangling, Taichen Road, 3  
\*e-mail: yernazyermekov@outlook.com

## MATHEMATICAL MODELING OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FOOD BIODEGRADABLE FILMS BASED ON WHEAT STARCH AND PCL

The rise in environmental awareness and the tightening of regulatory requirements (e.g., UN directives on sustainable development) are driving the transition from traditional plastics to biodegradable alternatives. In the food industry, such materials are particularly in demand for the production of packaging films that must combine functionality, safety, and the ability to degrade in natural conditions. Modern trends in the development of biodegradable packaging focus on creating environmentally safe materials with high functionality and economic efficiency. Of particular interest are blends of polycaprolactone (PCL) and starch, which can combine biodegradability with the necessary mechanical and barrier properties. This study examines the effect of the composition of starch-PCL composites on their mechanical properties and proposes a mathematical model for predicting film strength based on various compositional parameters. Experimental studies included the preparation of granules and films using extrusion and subsequent determination of strength characteristics. The application of mathematical modeling made it possible to identify optimal film

*compositions that ensure the required balance of strength, flexibility, and biodegradability. The results obtained confirm the feasibility of using PCL and starch blends as an alternative to traditional plastic packaging materials, while the developed model may be useful for further improving biodegradable film production technologies.*

**Key words:** *biodegradable packaging, polycaprolactone, starch, composite films, mechanical properties, mathematical modeling.*

#### 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, КНР, e-mail: liwenhao@nwsuaf.edu.cn. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5031-8717>.

**Асемгуль Мадениетовна Байкадамова** – PhD, руководитель центра организации научных исследований, Университет имени Шакарима города Семей; e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0062-6997>.

**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>.

**Асемгуль Мадениетовна Байкадамова** – PhD, Ғылыми зерттеулерді ұйымдастыру орталығының жетекшісі, Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті; e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0062-6997>.

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

#### Author Information

**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 Murat Khan** – 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>.

**Asemgul Madenietovna Baikadamova** – PhD, Head of the Research Organization Center, Shakarim University; e-mail: a.baikadamova@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0062-6997>.

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

*Поступила в редакцию 14.02.2025*

*Поступила после доработки 27.02.2025*

*Принята к публикации 04.03.2025*