

## БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ ДЛЯ УПАКОВКИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ. ЧАСТЬ 3: ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБНОСТИ К БИОРАЗЛОЖЕНИЮ

**И.Ю. Потороко**<sup>1</sup>, [irina\\_potoroko@mail.ru](mailto:irina_potoroko@mail.ru)  
**А.В. Малинин**<sup>1</sup>, [artemmalinin3@gmail.com](mailto:artemmalinin3@gmail.com)  
**А.В. Цатуров**<sup>1</sup>, [aram-chel@mail.ru](mailto:aram-chel@mail.ru)  
**А.М.Я. Кади**<sup>1</sup>, [ammarka89@gmail.com](mailto:ammarka89@gmail.com)  
**Н.А. Ботвинников**<sup>2</sup>, [nikita14042@gmail.com](mailto:nikita14042@gmail.com)  
**З.Ю. Генжак**<sup>2</sup>, [Zlata.Genzhak@gmail.com](mailto:Zlata.Genzhak@gmail.com)

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Гимназия № 23 им. В.В. Луценко, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Биоразложение материалов в природе – это сложный биохимический процесс преобразования сложных веществ, состоящий из трех стадий: трансформация (незначительные изменения молекул исходных материалов), фрагментация (разложение сложных молекул на более простые соединения), минерализация (превращение сложных веществ до простых соединений). Динамичность различных групп микроорганизмов, присутствующих в почве, обусловлена преимущественно условиями увлажнения почв и температурным фактором и сопряжена с химическим составом материалов как источников их питания. Данные факторы следует учитывать при создании биоразлагаемых материалов из органического сырья, так как процесс биоразложения во многом определяет их экологичность для биосферы. Относительно технологического процесса получения биоразлагаемых экоматериалов на процесс деструкции оказывает влияние состав композита, из которого был получен пленочный материал и те приемы, которые определяют свойства конечного продукта. Целью данного исследования стало исследование процессов биоразложения и оценка характеристик приготовленных образцов пленочного материала при различном соотношении основных сырьевых компонентов. Для опытных образцов были использованы следующие полисахариды: крахмал картофельный (КК) и целлюлоза льняная (ЦЛ) с разным соотношением в опытных пробах. Основными критериями показателями были определены: структура поверхности, паропроницаемость, водопоглощение, биоразлагаемость. Исследования показали различия у образцов в показателях, при этом наилучшие показатели были установлены для образца при использовании в составе основных ингредиентов КК:ЦЛ в соотношении 1.5:0.5. Даже при визуальном восприятии полученные пленочные материалы могут быть рекомендованы для использования в качестве упаковки для сухих пищевых продуктов.

**Ключевые слова:** биоразлагаемая пленка, картофельный крахмал, целлюлоза льняная, биоразложение

**Для цитирования:** Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 3: Исследование способности к биоразложению / И.Ю. Потороко, А.В. Малинин, А.В. Цатуров и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2022. Т. 10, № 1. С. 107–116. DOI: 10.14529/food220112

Original article  
DOI: 10.14529/food220112

## BIODEGRADABLE MATERIALS BASED ON PLANT POLYSACCHARIDES FOR FOOD PACKAGING. PART 3: STUDY OF BIODEGRADATION

**I.Yu. Potoroko**<sup>1</sup>, *irina\_potoroko@mail.ru*  
**A.V. Malinin**<sup>1</sup>, *artemmalinin3@gmail.com*  
**A.V. Tsaturov**<sup>1</sup>, *aram-chel@mail.ru*  
**A.M.Y. Kadi**<sup>1</sup>, *ammarka89@gmail.com*  
**N.A. Botvinnikov**<sup>2</sup>, *nikita14042@gmail.com*  
**Z.Yu. Genzhak**<sup>2</sup>, *Zlata.Genzhak@gmail.com*

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> Gymnasium No. 23 V.V. Lutsenko, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** Biodegradation is the transformation of complex substances using biological activity, consisting of three stages: transformation (minor changes in the molecule), fragmentation (decomposition of a complex molecule into simpler compounds), and mineralization (transformation of a complex substance into a simple substance). When creating biodegradable materials from organic raw materials, special attention is paid to the mechanisms of biodegradation. The destruction of the material is influenced by environmental factors and the type of exposure of microorganisms. The duration of destruction is influenced by the composition of the composite from which the film material was obtained. Biodegradable materials of the new composition should fulfill their functional purpose and further decompose into safe substances in the compost. The purpose of this study was to study the processes of biodegradation and to evaluate the characteristics of prepared samples of film material with a different ratio of the main raw materials (potato starch (CC) and flax cellulose (CL)). As part of the study, four film samples were obtained. In the course of the study, we found that the best indicators (surface structure, vapor permeability, water absorption, and biodegradability) are observed in sample 2 when used as part of the main ingredients of CC:CL in a ratio of 1.5:0.5. The resulting film materials can be used as packaging for dry food products.

**Keywords:** biodegradable film, potato starch, flax cellulose, biodegradation

**For citation:** Potoroko I.Yu., Malinin A.V., Tsaturov A.V., Kadi A.M.Y., Botvinnikov N.A., Genzhak Z.Yu. Biodegradable materials based on plant polysaccharides for food packaging. Part 3: Study of biodegradation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 107–116. (In Russ.) DOI: 10.14529/food220112

### Введение

На сегодняшний день вопрос, связанный с утилизацией и вторичной переработкой полимерных отходов, является актуальным. К основным способам утилизации относят захоронение на специальных полигонах, уничтожение посредством сжигания с бытовым мусором, утилизация для получения газообразного или жидкого топлива, переработка отходов полимеров из нефти продуктов во вторичное сырье с последующим использованием для производства новой продукции. Вторичная переработка включает в себя такие методы, как термоформование, термическое

разложение, механическое воздействие, химическое и т. д. Стоит отметить, что данные методы не могут в полном объеме решить поставленную проблему, в связи с этим наблюдается постоянный рост отходов, трудность в их контроле, сжигание негативно влияет на окружающую среду [9].

Одним из способов решения данной проблемы могут быть биоразлагаемые материалы, состоящие из органической матрицы и подвергающиеся процессу биоразложения на безопасные компоненты, такие как вода, углекислый газ, компост под действием микроорганизмов. Ученые во всем мире занимаются

получением биоразлагаемых материалов из возобновляемых источников биомассы, таких как крахмал, кофейная гуща, солома, переработанные пищевые отходы и т. д. Из биоразлагаемых материалов можно производить широкий ассортимент изделий, например, упаковка, подложки, одноразовая посуда и т. д. Получаемые изделия не уступают по функциональным свойствам аналогам, но в то же время безопасны для окружающей среды. К наиболее доступному сырью по ценовой категории для получения данных материалов можно отнести крахмалы, волокна целлюлозы [14].

Крахмал представляет собой смесь полисахаридов амилозы и амилопектина, мономером которых является альфа-глюкоза. Крахмалы экстрагируют из органического сырья, например, картофель, кукуруза и т. д. Целлюлоза представляет собой полимер, состоящий из повторяющихся молекул глюкозы, прикрепленных встык. Целлюлозные волокна получают из разных органических источников: древесина, хлопок, лен и т. д. На сегодняшний день большим интересом пользуется целлюлоза льняная в качестве наполнителя, а также для синтеза карбоксиметилцеллюлозы. Стоит отметить, что лен занимает промежуточное положение между хлопком и древесиной. Если в хлопке содержится до 98 %, а в древесине до 50 % целлюлозы, то отходы льняного производства (25 %) содержат до 80 % целлюлозы [10].

Большое внимание ученые уделяют механизмам биоразложения и их длительности при создании нового биоразлагаемого материала. Для оптимального протекания процесса биоразложения необходим определенный набор факторов окружающей среды: давление, температура, влажность в газовой или жидкой фазе, концентрация и вид солей, отсутствие или наличие кислорода (анаэробное или аэробное разложение), доступность альтернативных акцепторов электронов, наличие питательных веществ и микроэлементов, окислительно-восстановительные потенциалы, значение pH, изменение или стабильность условий окружающей среды, микроорганизмы – «противники», ингибиторы, альтернативные источники углерода, длина и интенсивность волны света. При этом необходимым условием является присутствие минимального содержания воды. Биоповреждения могут быть вызваны микроорганизмами с огромным раз-

нообразием ферментных систем и большой лабильностью метаболизма.

Механизмы биоразложения различаются в зависимости от типа материала, микроорганизмов, присутствующих в компосте, и условий окружающей среды, выделяют три основных вида воздействия микроорганизмов на материал композиционный:

- действие продуктов метаболизма (ферментов, органических кислот, пигментов, аминокислот) на основные технологические и физико-химические свойства материалов;
- механическое воздействие;
- биозагрязнение полимерных материалов и изделий из них.

Механизм процесса биодegradации материалов из возобновляемых источников происходит за счет разрастания мицелия гриба. Грибы для своего роста могут использовать поры и очень тонкие трещины материала, образующегося на стыке материала и частиц наполнителя. Постепенно происходит разрушение и изменение массы и структуры материала. Существуют также другие факторы, влияющие на целостность материала: влага, солнечный свет. Во влажную среду могут мигрировать встроенные в матрицу компоненты (наполнитель) за счет процессов вымывания, набухания, механического воздействия [1, 3, 4].

Целью данного исследования является разработка технологий пленочных материалов при различном соотношении основных сырьевых компонентов (крахмала картофельного и целлюлозы льняной) и оценка их характеристик и поведения в процессе биоразложения.

#### **Объекты и методы исследования**

Объектами исследования являлись биоразлагаемые пленки, полученные при различном соотношении растительных компонентов. В качестве основного сырья были использованы картофельный крахмал (нативный) (ГОСТ Р. 53876-2010) (далее КК) и целлюлоза льняная (далее ЦЛ).

Для исследований процесса биоразложения экоматериалов были определены следующие образцы: образец 1 – на основе компонентов КК:ЦЛ в соотношении 1.5:0.3; образец 2 – на основе компонентов КК:ЦЛ в соотношении 1.5:0.5; образец 3 – на основе компонентов КК:ЦЛ в соотношении 2.0:0.3; образец 4 – на основе компонентов КК:ЦЛ в соотношении 2.0:0.5.

В качестве критериев для исследования механизмов биоразложения и свойств новых материалов были определены следующие показатели:

- микроскопические исследования (состояния поверхности);
- паропроницаемость;
- водопоглощение;
- исследования биоразлагаемости в компосте в лабораторных условиях.

*Микроскопическое исследование поверхности пленок.* Исследование поверхности пленочного материала исследуемых образцов осуществлялось с помощью микроскопа оптического «Микромед ПОЛАР 1» (общее увеличение составляет  $\times 100$ ).

*Определение паропроницаемости пленок.* Исследование осуществлялось по модифицированной методике ASTM. Для определения проницаемости водяного пара использовались стеклянные флаконы диаметром 2 см и высотой 4,5 см. На дно каждого флакона помещали 3 г безводного  $\text{CaSO}_4$ . Поверх флаконов помещали исследуемые образцы пленок в виде дисковой формы немного больше диаметра флакона. Толщина дисковой формы образца составляет  $(3,0 \pm 0,2)$  мм, диаметр  $(50 \pm 1)$  мм. Приготовленные образцы помещались в эксикатор с насыщенным раствором  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . В эксикаторе обеспечивалась постоянная относительная влажность 97 % при температуре 25 °С. Флаконы с образцами пленки взвешивали каждые 24 часа. Скорость передачи водяного пара (WVP) ( $\text{gm}^{-1}\text{h}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ ) рассчитывается по формуле:

$$WVP = \frac{WVTR}{P(R_1 - R_2)} X,$$

где  $WVTR$  – разность между массой флакона с образцом (до погружения и после изъятия);  $X$  – толщина исследуемого образца пленки;  $P(R_1 - R_2)$  – 3073,93 Па (относительная влажность в эксикаторе) [11].

*Определение водопоглощения пленок.* Данный показатель является косвенной характеристикой биоразлагаемости пленки, поскольку наличие влаги необходимо для развития микроорганизмов. За основу методики водопоглощения принимался ГОСТ 4650-80 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения». Предварительно подготовленные образцы помещали в химические стаканы на  $100 \text{ см}^3$  с водой дистиллированной. Далее их переносили в термостат с установленной в нем температурой 30 °С и выдерживали в те-

чение 1, 3, 6, 8 суток. Размер пленочных образцов в форме квадрата со стороной, равной  $(50 \pm 1)$  мм и толщиной  $(3,0 \pm 0,2)$  мм.

Через определенные временные интервалы химические стаканы доставали из термостата, образцы извлекали из химического стакана, промокали фильтровальной бумагой, взвешивали и помещали обратно. Массу воды, поглощенную образцами, определяли как разницу массы исходного образца к массе высушенного образца, выражаемую в процентах [7].

*Исследования биоразлагаемости в компосте в лабораторных условиях.* Сущность метода заключается в имитации естественных почвенных условий. Исследуемые образцы пленок помещают в компост определенного биохимического состава, температуры и влажности. Для этих целей использовали почвогрунт для рассады и овощей Keva Bioterra. Состав: высококачественная смесь торфов различной степени разложения, песок речной термически обработанный, биогумус, комплексное минеральное удобрение, мука известняковая (доломитовая). Массовая доля питательных веществ: азот – не менее 275 мг/л, фосфор – не менее 325 мг/л, калий – не менее 325 мг/л, микроэлементы (присутствие). Скорость биоразлагаемости исследуемых образцов оценивается по динамике изменения их массы во времени, а также ряда характеристик. Процент снижения массы определяли по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100,$$

где  $m_1$  – начальная масса образца до внесения в компост (г),  $m_2$  – конечная масса образца после изъятия из компоста в течение определенного времени (г) [6].

#### Результаты исследований и их обсуждение

Для определения рационального соотношения ингредиентов в составе биоразлагаемого материала проводили варьирование количества биополимеров (картофельного крахмала и целлюлозы льняной) с установленным количеством поливинилового спирта, растворителя и пластификатора. При визуальном восприятии приготовленные образцы пленочного материала обладали повышенной эластичностью, бесцветные полупрозрачные матовые (рис. 1). Имели однородную поверхность без включений нерастворенного поливинилового спирта, волокна целлюлозы льняной равномерно встроены в матрицу пленки.

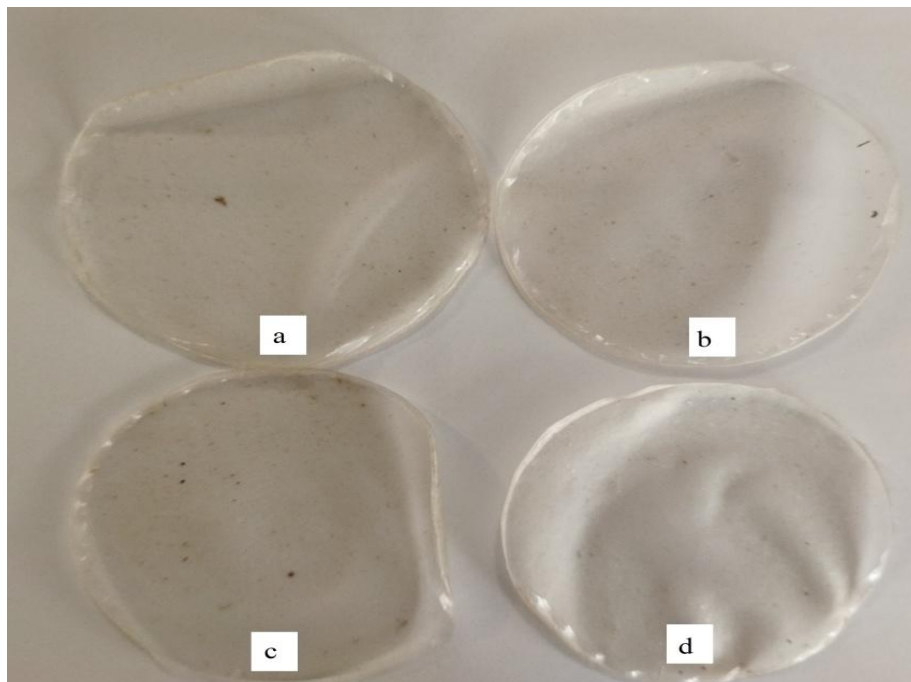


Рис. 1. Внешний вид образцов биоразлагаемых пленок, полученных при различном соотношении основного сырья: а – образец 1; б – образец 2; с – образец 3; d – образец 4

На поверхности пленок присутствуют места-ми волокна картофеля, из которого был экстрагирован крахмал. При растяжении все образцы пленок сохраняли целостность и возвращали исходную форму после снятия нагрузки, что свидетельствует о правильном протекании процесса пластификации [13].

Результаты исследования поверхности образцов биоразлагаемых пленок с использованием микроскопа оптического «Микромед ПОЛАР 1» (общее увеличение составляет  $\times 100$ ) представлены на рис. 2. Микрофотографии позволяют получить детальное представление о матрице материала, в которую встроена целлюлоза льняная. Пластифицированный крахмал с поливиниловым спиртом обволакивает волокно целлюлозы льняной. Все образцы имеют рельефную поверхность, присутствуют частицы картофеля. У образца 1 (а) на поверхности материала наблюдаются дефекты, такие как надрывы, уплотнения. Следовательно, изменения в матрице биоразлагаемого материала зависят от соотношения ингредиентов и их количества в составе.

Результаты анализа паропроницаемой способности исследуемых образцов биоразлагаемых пленок представлены в табл. 1. Нужно понимать, что данный показатель является важной характеристикой материала, влияю-

щей на сохраняемость продукта, чем ниже проникновение водяного пара, тем выше барьерные свойства. Высокие барьерные свойства не дают мигрировать наполнителю из биоразлагаемого материала в окружающую среду, в продукт. Также при интенсивном проникновении водяного пара в материал могут образовываться дефекты структуры, наблюдаться стадия деструкции материала [2].

Из представленных в табл. 1 результатов видно, что у всех образцов биоматериала в процессе инкубации паропроницаемость изменяется во времени (от 0,329 до  $0,511 \times 10^{-7}$  g/m.h.Па). Наименьшими барьерными свойствами обладает образец 1 (КК:ЦЛ/1.5:0.3), а наибольшие были отмечены у образца 2 (КК:ЦЛ/1.5:0.5) [10].

На следующем этапе исследования была проведена оценка водопоглощения образцов пленок в течение 8 суток. Данная характеристика является косвенным показателем способности к биоразложению экоматериала, поскольку присутствие влаги необходимо для развития микроорганизмов. Полученные результаты исследования представлены в табл. 2.

Данные, представленные в табл. 2, свидетельствуют о проходящих во влажной среде процессах деструкции материала; так, в период эксперимента в течение от 1 до 3 суток мате-

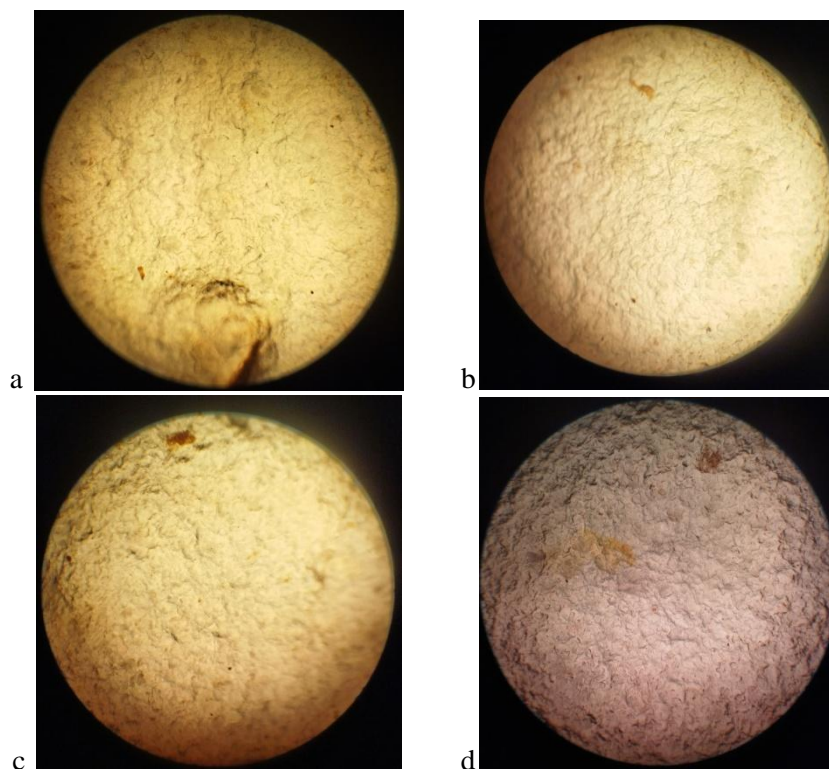


Рис. 2. Микрофотографии поверхности исследуемых образцов биоразлагаемых пленок, общее увеличение составляет  $\times 100$ : а – образец 1; б – образец 2; с – образец 3; d – образец 4

Таблица 1  
Паропроницаемая способность образцов биоразлагаемых пленок,  $\text{gm}^{-1}\text{h}^{-1}\text{Pa}^{-1}$

Объект исследования	$\Delta$ изменений показателя во времени	Паропроницаемость, ( $\times 10^{-7}$ g/m.h.Pa)		
		24 часа	48 часов	72 часа
Образец 1	-0,329	2,357	2,474	2,686
Образец 2	-0,511	2,634	2,782	2,123
Образец 3	-0,336	2,435	3,211	2,099
Образец 4	-0,421	2,638	2,997	2,217

Таблица 2  
Определение водопоглощения образцов биоразлагаемых пленок

Объект исследования	Водопоглощение, масс. % $\pm 0,2$			
	за 1 сутки	за 3 суток	за 6 суток	за 8 суток
Образец 1	79,50	82,58	72,62	67,21
Образец 2	39,37	60,10	56,85	54,66
Образец 3	67,15	67,33	59,88	58,90
Образец 4	62,39	69,84	72,80	59,69

риал интенсивно поглощает влагу, на 6–8 сутки наблюдается снижение массы, происходит процесс вымывания, т. е. миграция наполнителя. Высокий показатель водопоглощения наблюдается у образца 1 (КК:ЦЛ/ 1.5:0.3). Наименьшая абсорбция влаги была установлена у образца 2 (КК:ЦЛ/1.5:0.5). Диффузия влаги в материал сопровождается уменьшением в нем межмолекулярного взаимодействия, что в дальнейшем влияет на характеристики изделия (прочность) [5, 8, 12, 15].

На заключительном этапе было проведено исследование биоразлагаемости исследуемых образцов пленок в компосте в лабораторных условиях, степень биodeградации исследуемых образцов оценивали по показателю потери массы (рис. 3).

могут быть вызваны накоплением почвенных деструкторов. Для получения более полной информации об образцах биоразлагаемых материалов необходимо продолжить исследования по расширенной номенклатуре показателей [16, 17].

#### Выводы по результатам работы

Таким образом, результаты исследования показали, что при изменении соотношения основных ингредиентов, а именно картофельного крахмала и целлюлозы льняной в матриксе биоразлагаемого материала необходимо учитывать и регулировать показатели паропроницаемости, водопоглощения и биоразлагаемости. Для повышения гидрофобности биоразлагаемого материала предполагается внесение в состав матрицы молекул парафина,

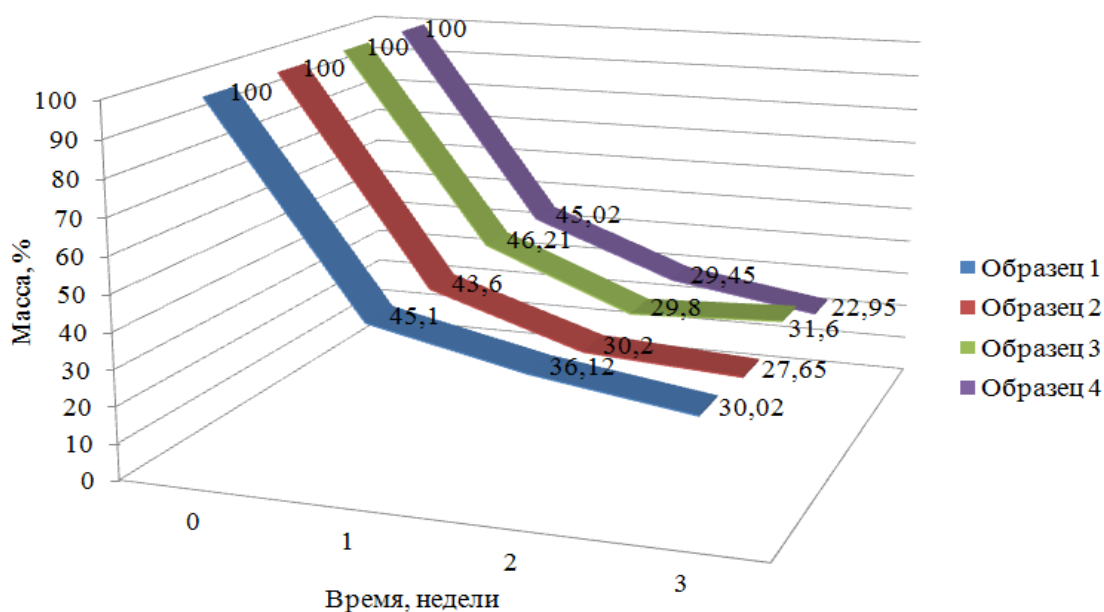


Рис. 3. Кинетические кривые снижения массы образцов биоразлагаемых пленок после выдерживания в компосте

В ходе оценки биоразлагаемости в компосте в течение 3 недель было установлено снижение массы у всех исследуемых образцов биоразлагаемых пленок, что свидетельствует об интенсивном процессе деструкции. Более интенсивно снижение массы наблюдается у образца 4 (КК:ЦЛ/2.0:0.5) и составляет 22,95 %. Более длительная деструкция наблюдается у образца 3 (КК:ЦЛ/2.0:0.3) и составляет 31,6 %. Стоит отметить, что через 3 недели у данного образца отмечается малозначимое увеличение в массе. Данные изменения

масел, жиров, воска. После инкубации в течение 3 недель у образцов наблюдаются характерные изменения структуры материала. Доказано, что все полученные образцы биоразлагаемых пленок в компосте подвергаются деструкции под воздействием микроорганизмов. Наилучшие показатели наблюдаются у образца 2 при использовании в составе основных ингредиентов КК:ЦЛ в соотношении 1.5:0.5. Полученные материалы могут быть использованы в качестве упаковки для сухих пищевых продуктов.

### Литература

1. Власов С.В., Ольхов А.А. Биоразлагаемые полимерные материалы // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. 2006. № 7. С. 23–26.
2. Захаров, И.В., Сидоров, Ю.Д., Поливанов, М.А., Василенко, С.В. Влияние поливинил-ацетата на паропроницаемость биоразлагаемых пленочных материалов // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 21. С. 77–79.
3. Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р., Глоба А.И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов. Минск: Изд-во БГТУ, 2014. 105 с.
4. Луканина Ю.К. Влияние структуры полимерной матрицы на развитие микромицетов на смешевых композициях полиолефинов с целлюлозой / Ю.К. Луканина, Н.Н. Колесникова, А.Н. Лихачев и др. // Пластические массы. 2010. № 11. С. 56–59.
5. Лонг Ю. Биоразлагаемые полимерные смеси и композиты из возобновляемых источников. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 464 с.
6. Потороко, И.Ю., Малинин, А.В., Цатуров, А.В., Удей Багале. Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 1 // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2020. Т. 8, № 2. С. 21–28. DOI: 10.14529/food200203
7. Потороко, И.Ю., Малинин, А.В., Цатуров, А.В., А.М. Кади, Удей Багале. Биоразлагаемые материалы на основе растительных полисахаридов для упаковки пищевых продуктов. Часть 2: Управление процессами утилизации // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2020. Т. 8, № 4. С. 30–37. DOI: 10.14529/food200404
8. Рыбкина С.П., Пахаренко В.В., Булах В.Ю. Биоразлагаемые упаковочные материалы на основе полисахаридов (крахмала) // Пластические массы. 2012. № 2. С. 61–64.
9. Сивкова Г.А., Хусаинова А.А. Получение биоразлагаемого пластика из возобновляемого сырья // Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы. Саратов, 2020. С. 25–30.
10. Терентьева Э.П. Основы химии целлюлозы и древесины: учебно-методическое пособие / Э.П. Терентьева, Н.К. Удовенко, Е.А. Павлова, Р. Г. Алиев. СПб.: ГОУВПО СПбГТУ РП, 2010. 23 с.
11. Ali Ghadetaj, Hadi Almasi, Laleh Mehryar. Development and characterization of whey protein isolate active films containing nanoemulsions of Grammosciadium ptrocarpum Bioss. essential oil // Food Packaging and Shelf Life, 2018. Vol. 16, P. 31–40.
12. Alberto Jimenez, María Jose Fabra, Pau Talens Amparo Chiralt. Edible and Biodegradable Starch Films: A Review // Food and Bioprocess Technology. 2012. Vol. 5. P. 2058–2076.
13. Curvelo A.A.S., de Carvalho A.J.F., Agnelli J.A.M. Thermoplastic starch-cellulosic fibers composites: preliminary results // Carbohydrate Polymers. 2001. Vol. 45. P. 183–188. DOI: 10.1016/S0144-8617(00)00314-3
14. Bledzki A.K., Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres // Progress in Polymer Science (Oxford). 1999. Vol. 24(2). P. 221–274.
15. Dong Y., Abdullah Z. Biodegradable and Water Resistant Poly(vinyl) Alcohol (PVA)/Starch (ST)/Glycerol (GL) // Halloysite Nanotube (HNT) Nanocomposite Films for Sustainable Food Packaging. Frontiers in materials. 2019. Vol. 6. P. 1–17.
16. Yu L., Petinakis S., Dean K., Bilyk A., Wu D. Green polymeric blends and composites from renewable resources // Macromol. Symp. 2007. P. 535–539.
17. Zhou Y., Hoover R., Liu Q. Relationship between amylase degradation and the structure and physicochemical properties of legume starches // Carbohydrate Polymers. 2004. Vol. 57. P. 200–317.

### References

1. Vlasov S.V., Olkhov A.A. [Biodegradable polymer materials]. *Polimernye materialy: izdeliya, oborudovanie, tekhnologii* [Polymer materials: products, equipment, technologies], 2006, no. 7, pp. 23–26. (In Russ.)



2. Zakharov I.V., Sidorov Yu.D., Polivanov M.A., Vasilenko S.V. Effect of polyvinyl acetate on the vapor permeability of biodegradable film materials. *Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 21, pp. 77–79. (In Russ.)
3. Krutko E.T., Prokopchuk N.R., Globa A.I. *Tekhnologiya biorazlagaemykh polimernykh materialov* [Technology of biodegradable polymer materials]. Minsk, 2014. 105 p.
4. Lukanina Yu.K., Kolesnikova N.N., Likhachev A.N., Khvatov A.V., Popov A.A. Influence of the polymer matrix structure on the development of micromycetes on mixed compositions of polyolefins with cellulose. *Plastic masses*, 2010, no. 11, pp. 56–59. (In Russ.)
5. Long Yu. *Biorazlagaemye polimernye smesi i kompozity iz vozobnovlyaemykh iistochnikov* [Biodegradable polymer mixtures and composites from renewable sources]. St. Petersburg, 2013. 464 p.
6. Potoroko I.Yu., Malinin A.V., Tsaturov A.V., Uday Bagale Biodegradable Materials Based on Plant Polysaccharides for Food Packaging. Part 1. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 21–28. (In Russ.) DOI: 10.14529/food200203
7. Potoroko I.Yu., Malinin A.V., Tsaturov A.V., Kadi A.M., Uday Bagale. Biodegradable Materials Based on Plant Polysaccharides for Food Packaging. Part 2: Managing Recycling Processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 30–37. (In Russ.) DOI: 10.14529/food200404
8. Rybkina S.P., Pakharenko V.V., Bulakh V.Yu. [Biodegradable packaging materials based on polysaccharides (starch)]. *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2012, no. 2, pp. 61–64. (In Russ.)
9. Sivkova G.A., Khusainova A.A. [Getting biodegradable plastic from renewable raw materials]. *Traditsionnaya i innovatsionnaya nauka: istoriya, sovremennoe sostoyanie, perspektivy* [Traditional and innovative science: history, current state, prospects], Saratov, January 10, 2020, pp. 25–30.
10. Terenteva E.P., Udovenko N.K., Pavlova E.A., Aliyev R.G. *Osnovy khimii tsellyulozy i drevesiny* [Fundamentals of pulp and wood chemistry]. St. Petersburg, 2010. 23 p.
11. Ali Ghadetaj, Hadi Almasi, Laleh Mehryar. Development and characterization of whey protein isolate active films containing nanoemulsions of *Grammosciadium ptrocarpum* Bioss. essential oil. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, vol. 16, pp. 31–40.
12. Alberto Jimenez, María Jose Fabra, Pau Talens Amparo Chiralt. Edible and Biodegradable Starch Films: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, vol. 5, pp. 2058–2076.
13. Curvelo A.A.S., de Carvalho A.J.F., Agnelli J.A.M. Thermoplastic starch-cellulosic fibers composites: preliminary results. *Carbohydrate Polymers*, 2001, vol. 45, pp. 183–188. DOI: 10.1016/S0144-8617(00)00314-3
14. Bledzki A.K., Gassan J. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 1999, vol. 24(2), pp. 221–274.
15. Dong Y., Abdullah Z. Biodegradable and Water Resistant Poly(vinyl) Alcohol (PVA)/Starch (ST)/Glycerol (GL). *Halloysite Nanotube (HNT) Nanocomposite Films for Sustainable Food Packaging*. *Frontiers in materials*, 2019, vol. 6, pp. 1–17.
16. Yu L., Petinakis S., Dean K., Bilyk A., Wu D. Green polymeric blends and composites from renewable resources. *Macromol. Symp.*, 2007, pp. 535–539.
17. Zhou Y., Hoover R., Liu Q. Relationship between amylase degradation and the structure and physicochemical properties of legume starches. *Carbohydrate Polymers*, 2004, vol. 57, pp. 200–317.

#### **Информация об авторах**

**Потороко Ирина Юрьевна**, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, irina\_potoroko@mail.ru

**Малинин Артем Владимирович**, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, artemmalinin3@gmail.com

**Цатуров Арам Валерикович**, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, aram-chel@mail.ru

**Кади Аммар Мохаммад Яхья**, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, ammarka89@gmail.com

**Ботвинников Никита Артемович**, учащийся Муниципального автономного общеобразовательного учреждения «Гимназия № 23 им. В.В. Луценко», Челябинск, Россия, nikita14042@gmail.com

**Генжак Злата Юрьевна**, учащийся Муниципального автономного общеобразовательного учреждения «Гимназия № 23 им. В.В. Луценко», Челябинск, Россия, Zlata.Genzhak@gmail.com

***Information about the authors***

**Irina Yu. Potoroko**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, irina\_potoroko@mail.ru

**Artem V. Malinin**, Post-graduate student at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, artemmalinin3@gmail.com

**Aram V. Tsaturov**, Post-graduate student at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, aram-chel@mail.ru

**Ammar M.Y. Kadi**, Post-graduate student at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, ammarka89@gmail.com

**Nikita A. Botvinnikov**, Student of the Municipal Autonomous General Educational Institution “Gymnasium No. 23 V.V. Lutsenko”, Chelyabinsk, Russia, nikita14042@gmail.com

**Zlata. Yu. Genzhak**, Student of the Municipal Autonomous General Educational Institution “Gymnasium No. 23 V.V. Lutsenko”, Chelyabinsk, Russia, Zlata.Genzhak@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 20.12.2021*

*The article was submitted 20.12.2021*