

В. В. Калмыкова, Ю. Н. Картушина, Д. А. Нилидин

БИОРАЗЛАГАЕМЫЕ ПЛЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КАРТОФЕЛЬНОЙ МЕЗГИ (ОТХОДА КРАХМАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА) С ДОБАВЛЕНИЕМ АЛЬГИНАТА НАТРИЯ И ПЕКТИНА*Ключевые слова: биоразлагаемая упаковочная плёнка, картофельная мезга, пектин, альгинат натрия, карбонат кальция, физико-механические свойства, отходы пищевых производств.*

Данная работа посвящена разработке биоразлагаемого упаковочного материала на основе картофельной мезги – отхода крахмального производства. Целью являлось создание композиции, соответствующей требованиям ГОСТ Р 57432-2017 по физико-механическим свойствам. Были исследованы три состава на основе картофельной мезги (содержание от 5,10% до 8,38%) с варьируемым содержанием гелеобразующих полимеров (пектина, альгината натрия, карбоксиметилцеллюлозы), пластификатора (глицерина) и упрочняющей добавки (карбоната кальция). Формование плёнки осуществляли методом послойного нанесения композиции на металлическую пластину с последующей сушкой. Методом испытаний на растяжение по ГОСТ 14236-81 были определены предел прочности при разрыве (R_m) и относительное удлинение (A_t). Установлено, что введение карбоната кальция увеличивает предел прочности на 37% по сравнению с составом без данного компонента, но снижает относительное удлинение на 46%, повышая хрупкость. Совместное использование альгината натрия (2,38%) и пектина (1,25%) в композиции с карбонатом кальция позволило получить сбалансированные свойства: $R_m = 15,6 \pm 0,5$ МПа, $A_t = 6,8 \pm 0,7\%$. Прочность выросла на 58% относительно состава без указанных добавок, а эластичность более чем в 4,5 раза превысила показатель состава с добавлением исключительно карбоната кальция. Итоговая композиция (содержащая, % масс.: картофельную мезгу — 5,10; пектин — 1,25; альгинат натрия — 2,38; карбонат кальция — 0,94; глицерин — 0,63; КМЦ — 0,41; эмульсию масла — 4,61, вода — 84,68) соответствует и превышает нормативные требования ($R_m \geq 14,0$ МПа, $A_t \geq 5,0\%$). Таким образом, экспериментально подтверждена целесообразность использования картофельной мезги в качестве наполнителя и предложена конкретная рецептура для создания биоразлагаемой упаковочной плёнки с соответствующими ГОСТ Р 57432-2017 свойствами.

V. V. Kalmykova, Y. N. Kartushina, D. A. Nilidin

BIODEGRADABLE FILM MATERIALS BASED ON POTATO PULP (WASTE FROM STARCH PRODUCTION) WITH THE ADDITION OF SODIUM ALGINATE AND PECTIN*Keywords: biodegradable packaging film, potato pulp, pectin, sodium alginate, calcium carbonate, physico-mechanical properties, food industry waste.*

This work is dedicated to the development of a biodegradable packaging material based on potato pulp, a by-product of starch production. The aim was to create a composition that meets the requirements of the Russian State Standard GOST R 57432-2017 for physical and mechanical properties. Three formulations based on potato pulp (content ranging from 5.10% to 8.38%) were investigated, with varying amounts of gelling polymers (pectin, sodium alginate, carboxymethylcellulose), a plasticizer (glycerin), and a reinforcing additive (calcium carbonate). The film was formed by layer-by-layer application of the composition onto a metal plate, followed by drying. Tensile tests according to GOST 14236-81 were used to determine the tensile strength (R_m) and relative elongation at break (A_t). It was found that the introduction of calcium carbonate increased the tensile strength by 37% compared to the composition without this component, but reduced the relative elongation by 46%, increasing brittleness. The combined use of sodium alginate (2.38%) and pectin (1.25%) in the composition with calcium carbonate yielded balanced properties: $R_m = 15.6 \pm 0.5$ MPa, $A_t = 6.8 \pm 0.7\%$. The strength increased by 58% relative to the composition without these additives, and the elasticity was more than 4.5 times higher than that of the composition containing only calcium carbonate. The final composition (containing, in mass%: potato pulp — 5.10; pectin — 1.25; sodium alginate — 2.38; calcium carbonate — 0.94; glycerin — 0.63; CMC — 0.41; oil emulsion — 4.61, water — 84.68) meets and exceeds the standard requirements ($R_m \geq 14.0$ MPa, $A_t \geq 5.0\%$). Thus, the feasibility of using potato pulp as a filler has been experimentally confirmed, and a specific formulation has been proposed for creating a biodegradable packaging film with properties compliant with GOST R 57432-2017.

Введение

С каждым годом рынок упаковочных материалов активно развивается, растут объёмы и расширяется разнообразие выпускаемой продукции [1]. Помимо классических пластиков набирают производственные обороты биопластики, доля которых в 2023 году составляла не более 1% от всех произведенных пластиков [2]. Но, по прогнозируемым данным, в 2030 году производство биопластиков достигнет 4,69 млн тонн, что демонстрирует рост более чем в 2 раза с показателя в 2,31 млн тонн за 2025 год. Около 44% биопластиков – это не биоразлагаемые, но биоосновные материалы (биополиэтилен, биополиэтилентерефталат,

лат, биополиамид). Более 55% биоразлагаемых пластиков для гибкой упаковки – это материалы на основе крахмала, а также такие полимеры, как полимолочная кислота (PLA), полигидроксиалканоаты (PHA), полибутиленисукцинат (PBS), полибутиленадипат-терефталат (PBAT) [2]. Среди них крахмалосодержащие материалы, а также композиции на основе различных природных полимеров (хитозана, целлюлозы, альгинатов, желатина) считаются наиболее доступными и перспективными благодаря низкой стоимости сырья и возможности его получения из возобновляемых источников, включая отходы агропромышленного комплекса [3]. При этом их успешное коммер-

ческое использование напрямую зависит от достижения требуемого комплекса физико-механических характеристик у материалов с их использованием [4].

Тем не менее, для широкого применения биоплёнок существует критическое ограничение. Большинство материалов не имеют достаточные физико-механические и барьерные свойства, чтобы составить серьёзную конкуренцию синтетическим аналогам. Крахмалопласты могут отличаться повышенной хрупкостью, высокой гигроскопичностью и склонностью к мгновенному растворению в воде [3, 5]. Для преодоления этих недостатков проводят модификацию композиций: вводят пластификаторы (глицерин, сорбит) для повышения эластичности, добавляют жировые продукты и органические кислоты (например, уксусную) для формирования прочного сетчатого каркаса, а также применяют наполнители, включая отходы, для улучшения прочности и снижения стоимости [5, 6, 7]. Однако результативность подобных модификаций, как показано в опубликованных исследованиях, определяется типом полимерной матрицы и требует строгого контроля рецептуры [8]. Особый интерес представляет утилизация крупнотоннажных отходов пищевых производств, объёмы которых в России достигают миллионов тонн в год [9]. Исследования композитов на основе растительного сырья демонстрируют, что введение волокнистых наполнителей позволяет целенаправленно влиять на их модуль упругости и деформационные характеристики [10]. Их использование для создания биоразлагаемых материалов решает две задачи: снижает экологическую нагрузку и обеспечивает наличие доступного вторичного сырья. Рассматриваемая авторами картофельная мезга является отходом крахмального производства и содержит остаточный крахмал и клетчатку [11], что делает ее потенциально эффективным биосовместимым наполнителем для полимерных композиций. Однако для создания конкурентоспособного материала на основе картофельной мезги необходимо решить ряд технологических задач [12].

Целью данной работы являлась разработка биоразлагаемого упаковочного материала на основе картофельной мезги, соответствующего заданным физико-механическим параметрам по ГОСТ Р 57432-2017¹.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать рецептуру композиции на основе картофельной мезги с различным содержанием гелеобразующих полимеров (пектин, альгинат натрия, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ)), пластификатора (глицерин) и упрочняющей добавки (карбонат кальция);
2. Определить влияние введения карбоната кальция на физико-механические свойства материала;
3. Исследовать эффективность совместного введения альгината натрия и пектина в композицию.

Материалы и методы

В экспериментальном исследовании были использованы следующие материалы: картофельная

мезга (отход крахмального производства ООО «РУС-НАБ» г. Москва), содержание крахмала ~10%, клетчатки ~45%, предварительно высушенная и измельченная до размера 20–40 мкм, эмульсия масла (масло подсолнечное рафинированное, ООО «ТД «ХИММЕД», ГОСТ 1129-2025), лецитин подсолнечный (ООО «Ювикс Фарм», ГОСТ 32052-2013), вода дистиллированная (ГОСТ Р 58144-2018), карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ, сухой порошок (ООО «ТД «ХИММЕД», ТУ 2231-034-79249837-2006)), пектин термостабильный (сухой порошок (ООО «ТД «ХИММЕД», ГОСТ 29186-91)), глицерин (пластификатор, чистота ≥99,5% (ООО «ТД «ХИММЕД», ГОСТ 6824-96)), вода дистиллированная, суспензия карбоната кальция (мел (ООО «ТД «ХИММЕД», ГОСТ 8253-79), диспергированный в воде), альгинат натрия (сухой порошок высокой чистоты (ООО «Архангельский водорослевый комбинат», ТУ 10.89.19-030-41669896-2024)).

Соотношение компонентов композиций представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Состав исследованных композиций, масс. %

Table 1 – Composition of the investigated formulations, wt. %

Компонент	Композиция 1	Композиция 2 (карбонат кальция)	Композиция 3 (пектин+альгинат)
Эмульсия масла	6,04	7,58	4,61
КМЦ	0,25	0,52	0,41
Глицерин	6,43	0,67	0,63
Карбонат кальция	–	1,34	0,94
Картофельная мезга	8,05	8,38	5,10
Пектин	4,95	5,42	1,25
Альгинат натрия	–	–	2,38
Вода	74,28	76,09	84,68
Итого	100	100	100

Методика эксперимента

Для клейстеризации крахмала, содержащегося в наполнителе, необходимо произвести нагревание [15]. Мезга замешивается с отмеренным количеством воды и выдерживается на водяной бане при температуре 60°C в течение 10 минут при постоянном перемешивании. Полученная масса охлаждается до 40°C, после чего в неё вводится пектин до полного растворения и формирования гелеобразной смеси.

Перед тем как начать работу с мезгой необходимо подготовить вспомогательные гели и суспензию. Альгинат натрия и карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) заливаются отмеренными порциями дистиллированной

¹ ГОСТ Р 57432-2017. Упаковка. Плёнки из биоразлагаемого материала. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2017.

воды при интенсивном перемешивании, после чего отставляются для набухания при комнатной температуре ($23\pm 2^\circ\text{C}$): альгинат натрия – на 40 мин, КМЦ – на 30 мин, до образования однородных вязких гелей.

Далее к основной гелеобразной смеси последовательно, при постоянном механическом перемешивании (400 об/мин, в течение 5–7 минут), добавляются гели альгината и КМЦ, после вводятся глицерин и эмульсия масла. Эмульсию масла готовят непосредственно перед использованием: лецитин диспергируют в тёплой воде ($\approx 40^\circ\text{C}$) и оставляют на 10 мин, затем добавляют растительное масло и перемешивают до стабильной эмульсии. В последнюю очередь вводится суспензия карбоната кальция, которую готовят диспергированием навески мела в воде с помощью ультразвуковой обработки в течение 3–5 мин. Все указанные компоненты тщательно перемешиваются в течение 5–7 минут. Финальная гомогенизация проводится с использованием роторно-статорного гомогенизатора модели «Laboga» (Россия) при скорости вращения 1500 об/мин: 2–3 цикла по 15–20 секунд работы с последующим охлаждением массы в ледяной бане в течение 30 секунд. Температура композиции в процессе гомогенизации контролируется контактным термометром и не превышает 40°C . Полученная однородная масса при необходимости корректируется по вязкости добавлением холодной воды. Регулировку вязкости проводили, контролируя предельное напряжение сдвига композиции. Оптимальной считали консистенцию, при которой композиция сохраняла форму после нанесения, но легко распределялась под шпателем, не образуя «волн» и «гребней».

Формование плёнки осуществляли методом послойного нанесения на предварительно нагретую до 50°C металлическую пластину. Которая затем помещалась между плитами гидравлического вулканизационного пресса модели «KOMED 400×400» (усилие 65 т, производитель ООО «КОМЕД», Россия). Плёнка сушилась без приложения давления до полного высыхания. После пластина извлекалась и на неё шпателем наносился следующий тонкий слой композиции. Процедура нанесения и сушки повторялась 4 раза.

Готовую плёнку отделяли от подложки и кондиционировали при температуре $23\pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $50\pm 5\%$ не менее 1 часа перед испытаниями.

Методы анализа

Физико-механические свойства образцов на соответствие ГОСТ 14236-81², а именно прочность на разрыв и относительное удлинение, определяли в Центре коллективного пользования «Физико-химические методы исследования» Волгоградского государственного технического университета, на разрывной машине Zwick/Roell 5,0 kN. Испытания проводили при скорости движения 20 мм/мин и предварительной нагрузке 0,5 Н.

Продольную прочность на разрыв (σ , МПа) рассчитывали по формуле (1):

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad (1)$$

где F_{\max} – максимальная нагрузка при разрыве, Н; S_0 – начальная площадь сечения образца, мм^2 .

Относительное удлинение (A_t , %) определяли как отношение приращения длины образца в момент разрыва к его начальной расчетной длине по формуле (2):

$$A_t = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

где L_u – конечная длина рабочего участка после разрыва, мм; L_0 – начальная длина рабочего участка между зажимами, мм.

Результат и обсуждение

В ходе эксперимента были получены образцы плёнок трёх различных составов (см. таблицу 1). Визуальная оценка показала, что изменение состава положительно влияло на качество плёнокообразования.

Образец композиции 1 требовал большего количества циклов нанесения для получения сплошной поверхности без дефектов. Введение суспензии карбоната кальция в композицию 2 позволило снизить усадку и растрескивание при сушке, что сделало возможным получение более тонких и однородных плёнок, однако образцы оставались достаточно хрупкими. Наилучшие результаты достигнуты для композиции 3, содержащей, дополнительно к карбонату кальция, комбинацию альгината натрия и пектина (рис. 1). В отличие от композиций 1 и 2, образцы композиции 3 отличаются гладкой, однородной поверхностью без видимых дефектов, равномерной толщиной по всей площади и отсутствием хрупкости при изгибе. Материал демонстрирует характерную для эластичных плёнок способность к обратимой деформации без разрушения.



Рис. 1 – Образец плёнки композиции 3
Fig. 1 – Film sample of Composition 3

Для оценки влияния модификации состава на механические свойства, результаты которых представлены в таблице 2.

Наглядно сравнительный разброс значений предела прочности и относительного удлинения для трёх составов отражён на гистограмме пределов (рис. 2).

Анализ данных таблицы 2 и гистограммы (рис. 2) показывает, что введение карбоната кальция в композицию 2 привело к увеличению предела прочности R_m в среднем на 37% по сравнению с композицией 1 (рис. 2 красный и синий столбцы) (с 11,5 до

² ГОСТ 14236-81 Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 1981.

18,0 МПа), что подтверждает его роль как упрочняющего наполнителя. Однако при этом наблюдается снижение относительного удлинения A_t на 46% (с 3,7 до 0,8%), что свидетельствует о повышении жёсткости и хрупкости материала.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики полученных плёнок

Table 2 – Physico-mechanical characteristics of the obtained films

Состав	Предел прочности при разрыве, R_m , МПа	Относительное удлинение при разрыве, A_t , %
Композиция 1	$11,5 \pm 1,8$	$3,7 \pm 0,5$
Композиция 2 (с карбонатом кальция)	$18,0 \pm 3,6$	$0,8 \pm 0,8$
Композиция 3 (пектин + альгинат)	$15,6 \pm 0,5$	$6,8 \pm 0,7$
Требования ГОСТ Р 57432-2017 (для смешанных биоразлагаемых полимерных материалов)	$\geq 14,0$	$\geq 5,0$

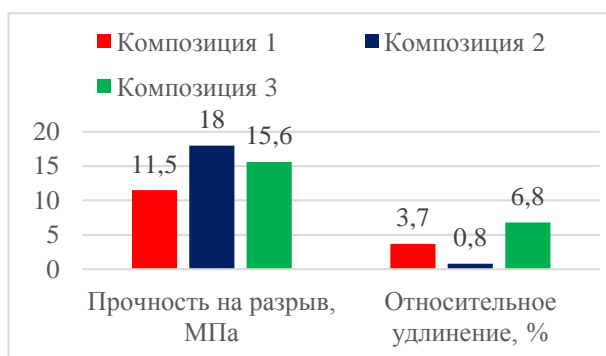


Рис. 2 – Сравнительная гистограмма пределов прочности (R_m , МПа) и относительного удлинения (A_t) для трёх составов плёнок

Fig. 2 – Comparative histogram of tensile strength (R_m) and relative elongation (A_t) for three film compositions

Наиболее оптимальные характеристики определены для композиции 3 (рис. 2, зелёный столбец). При существенном увеличении прочности R_m до 15,6 МПа (рост на 58% относительно композиции 1) материал также показал увеличение относительного удлинения A_t до 6,8%, что более чем в 4,5 раза превышает показатель композиции 2 и демонстрирует хорошую эластичность. На гистограмме для этого состава наблюдается наилучшее соотношение прочности и эластичности, что подтверждает улучшение эластичных свойств. Данный эффект можно объяснить совмещённым действием компонентов: карбонат кальция выполняет функцию упрочняющего

агента, а комбинация альгината натрия и пектина формирует эластичную полимерную сетку, стабилизирующую водородными и ионными связями.

Известно, что введение карбоната кальция в биополимеры приводит к увеличению жёсткости и модуля упругости, однако может сопровождаться снижением относительного удлинения, что свидетельствует о повышении хрупкости материала [14, 15]. Полученные в настоящем исследовании результаты (рост прочности на 37% и снижение удлинения на 46% для композиции 2) полностью согласуются с этими литературными данными. Проблема может быть решена добавлением пектина и альгината натрия [16, 17]. Альгинат натрия, имеющий высокую плотность карбоксильных групп, обеспечивает прочный каркас, а пектин формирует более эластичные зоны, компенсируя избыточную хрупкость [16]. Введение альгината натрия в качестве стабилизатора и плёнкообразующего агента в композиции с пектином позволяет увеличить относительное удлинение при разрыве не менее чем в три раза по сравнению с чистыми пектиновыми плёнками [17]. Ионы кальция (Ca^{2+}), диссоциирующие из карбоната кальция в водной среде, взаимодействуют со свободными карбоксильными группами пектина и альгината натрия, образуя поперечные связи [16, 17]. Это приводит к формированию трёхмерной полимерной сетки, повышающей жёсткость и прочность материала. Совместное действие всех трех компонентов создаёт структуру типа «взаимопроникающих сеток», что подтверждается результатами механических испытаний: композиция 3 демонстрирует одновременно высокую прочность (15,6 МПа) и эластичность (6,8%). Подобное сочетание позволило преодолеть типичный для крахмалосодержащих материалов недостаток – повышенную хрупкость.

Сравнение с требованиями ГОСТ Р 57432-2017 (для гибкой упаковки: $R_m \geq 14,0$ МПа, $A_t \geq 5,0\%$) показывает, что образцы композиции 3 превышают минимальное требование. Композиция 1 и композиция 2 не соответствуют требованиям по прочности и удлинению, что указывает на необходимость модификации для достижения заданных параметров.

Заключение

Экспериментально подтверждена целесообразность использования картофельной мезги в качестве наполнителя для биоразлагаемых плёнок. Материалы на её основе демонстрируют физико-механические свойства, сопоставимые с требованиями, предъявляемыми к полимерным упаковочным материалам.

В ходе выполнения работы был выявлен оптимальный состав биоразлагаемой плёнки – композиция 3, содержащая, % масс.: картофельная мезга – 5,10; пектин – 1,25; альгинат натрия – 2,38; карбонат кальция – 0,94; глицерин – 0,63; КМЦ – 0,41; эмульсия масла – 4,61; вода – 84,68.

Данный состав обеспечивает предел прочности $15,6 \pm 0,5$ МПа и относительное удлинение $6,8 \pm 0,7$ %, что соответствует и превышает требования ГОСТ Р 57432-2017 ($R_m \geq 14,0$ МПа, $A_t \geq 5,0\%$).

Исследовано влияние различных добавок на свойства плёнок. Установлено, что введение карбоната кальция (композиция 2) повышает предел прочности на 37% по сравнению с составом без него, но снижает относительное удлинение на 46%, что свидетельствует о повышении хрупкости материала в данном диапазоне концентраций. Выявлено, что совместное введение альгината натрия (2,38%) и пектина (1,25%) в композицию с карбонатом кальция позволяет компенсировать этот недостаток. При таком соотношении компонентов достигается сбалансированное сочетание свойств: относительное удлинение возрастает до 6,8% (более чем в 4,5 раза выше, чем при использовании только карбоната кальция), а предел прочности составляет 15,6 МПа (на 58% выше исходного).

Полученные результаты подтверждают потенциальную пригодность разработанного материала для производства биоразлагаемой гибкой упаковки.

Литература

1. Л.В. Беркетова, В.А. Полковникова, Бюл. Науки Практик., 6, 10, 234-243 (2020). DOI: 10.33619/2414-2948/59.
2. Л.В. Александрова, М.В. Успенская, А.Л. Ишевский, Вестн. ВГУИТ, 85, 2, 216-225 (2023). DOI: 10.20914/2310-1202-2023-2-216-225.
3. Е.Н. Подденёжный, А.А. Бойко, А.А. Алексеенко и др., Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого, 2(61), 1-11 (2015).
4. Ю.Д. Сидоров, И.И. Лин, Вестн. Технол. Ун-та, 28, 3, 40-48 (2025). DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_3_40.
5. Н.Д. Лукин, В.В. Ананских, Л.Д. Шлейна, А.В. Родионова, Пищ. Пром-сть, 11, 13-15 (2019). DOI: 10.24411/0235-2486-2019-10169.
6. Я.О. Майорова, М.С. Воронина, Изв. ДВФУ. Экон. Упр., 4, 87-97 (2021). DOI: 10.24866/2311-2271/2021-4/87-97.
7. В.В. Сабанцев, Я.В. Сучугов, К.А. Тёскин и др., В сб. Пищевые инновации и биотехнологии, Изд-во Кемеровского гос. ун-та, Кемерово, 2024. С. 81-82.
8. К.Г. Анисеева, Р.Р. Сафин, Вестн. Технол. Ун-та, 27, 6, 47-50 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_6_47.
9. И.А. Гаджибекова, В сб. Совершенствование технологических процессов в пищевой, химической и перерабатывающей промышленности, ООО «Издательство АЛЕФ», Махачкала, 2024. С. 35-40.
10. М.Р. Гибадуллин, Н.В. Аверьянова, А.И. Борисова, В.А. Петров, Вестн. Технол. Ун-та, 26, 9, 26-29 (2023). DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_9_26.
11. В.В. Литвяк, Д.А. Соломин, Крахм. Произв., 1(7), 5-13 (2025).
12. А.И. Суворова, И.С. Тюкова, Е.И. Труфанова, Усп. Хим., 69, 5, 494-504 (2000).
13. Р.Е. Гольцман, Н.И. Чилинбаева, В сб. Пищевая индустрия: инновационные процессы, продукты и технологии, ООО «Сам Полиграфист», Москва, 2024. С. 848-851.
14. Homavand A., Cree D.E., Wilson L.D., Waste, 2, 2, 169-185 (2024). DOI: 10.3390/waste2020010.
15. Lim C.S., Kim M.K., Kim T.Y. et al., Mater. Res. Express, 12, 5, 055301 (2025). DOI: 10.1088/2053-1591/adcf12.
16. B.H. Golubev, T.B. Tsyganova, Health, Food & Biotechnol., 6, 4, 57-72 (2024). DOI: 10.36107/hfb.2024.i4.s240.
17. A. Kannan, V. Iyer, S. Gupta, Eng. Proc., 37, Article 80 (2023). DOI: 10.3390/ECP2023-14668.

References

1. L.V. Berketova, V.A. Polkovnikova, Bull. Sci. Pract., 6, 10, 234-243 (2020). DOI: 10.33619/2414-2948/59
2. L.V. Aleksandrova, M.V. Uspenskaya, A.L. Ishevskii, Vestn. VGUIT, 85, 2, 216-225 (2023). DOI: 10.20914/2310-1202-2023-2-216-225
3. E.N. Poddenezhnyi, A.A. Boiko, A.A. Alekseenko et al., Vestn. GGTU im. P.O. Sukhogo, 2(61), 1-11 (2015).
4. Yu.D. Sidorov, I.I. Lin, Herald of Technological University, 28, 3, 40-48 (2025). DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_3_40
5. N.D. Lukin, V.V. Ananskikh, L.D. Shleina, A.V. Rodionova, Pishch. Prom-st', 11, 13-15 (2019). DOI: 10.24411/0235-2486-2019-10169
6. Ya.O. Mayorova, M.S. Voronina, Izv. DVGU. Ekon. Uprav., 4, 87-97 (2021). DOI: 10.24866/2311-2271/2021-4/87-97
7. V.V. Sabantsev, Ya.V. Suchugov, K.A. Tioskin et al., In: Sb. Pishchevye innovatsii i biotekhnologii [Collection: Food Innovations and Biotechnologies], Izd-vo Kemerovskogo gos. un-ta, Kemerovo, 2024. Pp. 81-82.
8. K.G. Anikeeva, R.R. Safin, Herald of Technological University, 27, 6, 47-50 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_6_47
9. I.A. Gadzhibekova, In: Sb. Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov v pishchevoi, khimicheskoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti [Collection: Improvement of Technological Processes in the Food, Chemical and Processing Industries], ООО "Izdatel'stvo ALEF", Makhachkala, 2024. Pp. 35-40.
10. M.R. Gibadullin, N.V. Averyanova, A.I. Borisova, V.A. Petrov, Herald of Technological University, 26, 9, 26-29 (2023). DOI: 10.55421/1998-7072_2023_26_9_26
11. V.V. Litvyak, D.A. Solomin, Krakhm. Proizv., 1(7), 5-13 (2025).
12. A.I. Suvorova, I.S. Tyukova, E.I. Trufanova, Usp. Khim., 69, 5, 494-504 (2000).
13. R.E. Gol'tsman, N.I. Chilinbaeva, In: Sb. Pishchevaya industriya: innovatsionnye protsessy, produkty i tekhnologii [Collection: Food Industry: Innovative Processes, Products and Technologies], ООО "Sam Poligrafist", Moscow, 2024. Pp. 848-851.
14. Homavand A., Cree D.E., Wilson L.D., Waste, 2, 2, 169-185 (2024). DOI: 10.3390/waste2020010.
15. Lim C.S., Kim M.K., Kim T.Y. et al., Mater. Res. Express, 12, 5, 055301 (2025). DOI: 10.1088/2053-1591/adcf12.
16. V.N. Golubev, T.B. Tsyganova, Health, Food & Biotechnol., 6, 4, 57-72 (2024). DOI: 10.36107/hfb.2024.i4.s240.
17. A. Kannan, V. Iyer, S. Gupta, Eng. Proc., 37, Article 80 (2023). DOI: 10.3390/ECP2023-14668.

© **В. В. Калмыкова** – магистрант кафедры «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности» (ПЭБЖ), Волгоградский государственный технический университет (ВГТУ), Волгоград, Россия, kalmykovavaleriyavitalevna@gmail.com; **Ю. Н. Картушина** – к.геол.-мин.н., доцент кафедры ПЭБЖ, ВГТУ, kartysina@rambler.ru; **Д. А. Нилидин** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химия и технология переработки эластомеров», ВГТУ, dmitriy.nilidin@gmail.com.

© **V. V. Kalmykova** – Master-Student, Department of Industrial Ecology and Life Safety (IELS), Volgograd State Technical University (VSTU), Volgograd, Russia, e-mail: kalmykovavaleriyavitalevna@gmail.com; **Yu. N. Kartushina** – PhD (Geological-Mineralogical Sci.), Associate professor of the IELS department, VSTU, kartysina@rambler.ru; **D. A. Nilidin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the Department of Chemistry and Technology of Elastomer Processing, VSTU, dmitriy.nilidin@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 17.02.26.

Дата принятия рукописи в печать – 25.03.26.