

Обзорная статья
УДК 678.06:547.96
EDN IZMZWU

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-44-51>

Павел Николаевич Рудовский¹

Светлана Геннадьевна Смирнова²

Андрей Юрьевич Смирнов³

^{1,2,3} Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

¹ pavel_rudovsky@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8675-2910>

² SW_Smirnova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0029-497X>

³ a.n.d.r.e.u.k.a@list.ru; <https://orcid.org/0009-0003-7183-6358>

КОМПОСТИРУЕМЫЕ КОМПОЗИТЫ ИЗ НАТУРАЛЬНЫХ ВОЛОКОН С ГЛЮТЕНОВОЙ МАТРИЦЕЙ

Аннотация. В обзоре систематизированы современные данные о компостируемых композиционных материалах на основе глютенной матрицы, армированной натуральными волокнами растительного и животного происхождения. Рассмотрены прочностные, упругие, демпфирующие, изоляционные и гидрофобные свойства таких материалов, проанализированы ключевые технологические подходы к их получению (горячее прессование, экструзия, литье под давлением, 3D-печать). Особое внимание уделено перспективным областям применения – от упаковки и сельского хозяйства до строительства и электроники. Рассмотрено использование глютенов животного происхождения (желатин, коллаген, кератин, белки молочной сыворотки) в качестве биоразлагаемой матрицы для композитов.

Ключевые слова: компостируемые композиты, пшеничный глютен, глютены животного происхождения, натуральные волокна, биоразлагаемость, прочность, демпфирование, горячее прессование, экструзия

Для цитирования: Рудовский П. Н., Смирнова С. Г., Смирнов А. Ю. Компостируемые композиты из натуральных волокон с глютенной матрицей // Технологии и качество. 2026. № 2(72). С. 44–51. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-44-51>.

Review article

Pavel N. Rudovsky¹

Svetlana G. Smirnova²

Andrey Yu. Smirnov³

^{1,2,3} Kostroma State University, Kostroma, Russia

COMPOSTABLE COMPOSITES FROM NATURAL FIBERS WITH GLUTEN MATRIX

Abstract. The review systematises current data on compostable composite materials based on gluten matrix reinforced with natural fibres of plant and animal origin. The strength, elastic, damping, insulating, and hydrophobic properties of such materials are considered, the key technological approaches to their production (hot pressing, extrusion, injection moulding, 3D-printing) are analysed. Special attention is paid to promising areas of application – from packaging and agriculture to construction and electronics. A separate section is devoted to the use of animal-derived glutens (gelatine, collagen, keratin, whey proteins) as biodegradable matrix for composites.

Keywords: compostable composites, wheat gluten, animal-derived glutens, natural fibres, biodegradability, strength, damping, hot pressing, extrusion

For citation: Rudovsky P. N., Smirnova S. G., Smirnov A. Yu. Compostable composites from natural fibers with gluten matrix. Technologies & Quality. 2026. No 2(72). P. 44–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-2-72-44-51>.

Проблема накопления неразлагающихся полимерных отходов и истощение запасов нефти стимулируют переход от линейной экономики к экономике замкнутого цикла. Согласно прогнозам, к 2026 году мировое производство пластиковых изделий достигнет 600 млн т, что требует срочного поиска экологически безопасных альтернатив синтетическим полимерам. Одним из перспективных направлений является создание биоразлагаемых композиционных материалов, в которых как матрица, так и армирующий наполнитель имеют природное происхождение [1–5].

Пшеничный глютен – побочный продукт мукомольной и биоэтанольной промышленности – привлекает внимание как доступная биоразлагаемая и нетоксичная матрица для полимерных композитов [6, 7]. Глютен представляет собой сложную смесь белков, преимущественно глиадинов и глютенинов, и обладает способностью к термоиндуцированной сшивке с образованием пространственной сетки [8]. Его стоимость крайне низка (менее 1 доллара за кг), а механические свойства отвержденного глютена сопоставимы с эпоксидными смолами [9]. В то же время натуральные волокна (льняные, пеньковые, джутовые, банановые, кокосовые и др.) служат идеальными армирующими компонентами, повышающими прочность и жесткость материала [7, 10]. Композиты на основе глютена и натуральных волокон могут стать экологичной альтернативой нефтехимическим пластикам в широком спектре применений – от упаковки и одноразовой посуды до автомобильных панелей и печатных плат [9].

Помимо растительных белков, значительный интерес представляют глутены животного происхождения – желатин, коллаген, кератин,

белки молочной сыворотки [11]. Эти белки являются побочными продуктами пищевой и перерабатывающей промышленности и обладают ценными свойствами: они биоразлагаемы, биосовместимы, нетоксичны и способны к термопластичной переработке. Однако, как и растительные белки, они имеют ограниченную механическую прочность и высокую гидрофильность, что делает необходимым их армирование волокнистыми наполнителями [11]. Рассмотрим некоторые из них.

Желатин – продукт, полученный из тканей животных, основой которого служит коллаген, белок, содержащийся в костях, коже, хрящах и соединительных тканях млекопитающих (коровы, свиньи). Рыбный желатин получают из возобновляемого сырья – чешуи рыб; он более биологически безопасен и обладает повышенной прочностью и адгезией к биологическим тканям по сравнению с животным желатином [12].

Композиты на основе желатина и натуральных волокон демонстрируют высокие механические характеристики. Композит шелковое волокно/желатин (20 мас. % волокна), полученный методом компрессионного формования, показал предел прочности при растяжении 44,5 МПа, модуль упругости 0,65 ГПа, предел прочности при изгибе 63 МПа, модуль упругости при изгибе 3,7 ГПа, ударную вязкость 5,1 кДж/м² и твердость 96 по Шору А [13]. Испытания на биоразлагаемость показали, что композит теряет 52,1 % массы за 24 часа.

Коллаген является структурным белком, наиболее распространенным в животном мире. Он содержится в коже, белой соединительной ткани и костях животных. Механические свойства коллагена существенно зависят от масштаба (табл.)

Т а б л и ц а

Механические свойства коллагена на разных масштабных уровнях

Уровень организации	Прочность при растяжении	Модуль упругости (Юнга)	Относительное удлинение
Молекула/Фибрилла	~0,22 ГПа (предел текучести)	(0,86 ± 0,45) ГПа (при малых деформациях)	До 100 %
Волокно (единичное)	~2 ГПа (расчетное)	1,0...5,4 ГПа	~10 %
Ткань (сухожилие)	30...100 МПа	0,4...1,2 ГПа	6...30 %
Ткань (кость)	~100 МПа	10...20 ГПа	0,5...1,0 %
Пленка (реконструированная)	0,32...0,91 МПа	(2,09 ± 0,42) МПа (для сети фибрилл)	(37,1 ± 2,2) % (для сети фибрилл)

Кератин – белок, содержащийся в шерсти, волосах, перьях и рогах животных. Он обладает высокой механической прочностью и устойчивостью к химическому воздействию. Композиты на основе кератина и натуральных волокон исследуются для создания биоразлагаемых материалов с улучшенными механическими свойствами. Кератин является одним из перспектив-

ных материалов для создания «искусственных» резиновых/белковых композитов, обладающих такими преимуществами, как низкая стоимость, легкость, биоразлагаемость и высокая доступность [11].

Растительные глутены (пшеничный, кукурузный) и глутены животного происхождения (желатин, коллаген, кератин) имеют как

общие черты, так и различия. Все они биоразлагаемы, нетоксичны, доступны в больших количествах как побочные продукты промышленности и требуют армирования волокнами для улучшения механических свойств [11]. Однако белки животного происхождения часто обладают лучшей биосовместимостью и могут быть получены с более высокой чистотой, что важно для медицинских применений. С другой стороны, растительные глютены могут быть более дешевыми и доступными в больших масштабах. Выбор типа белка зависит от конкретного применения и требуемых свойств композита. Интересным направлением является создание гибридных композитов на основе смеси растительных и животных белков для достижения синергетического эффекта [11].

Механические характеристики композитов определяются типом волокна, его объемной долей, длиной и ориентацией, а также методом получения материала и условиями формования [7, 10]. Введение натуральных волокон в пластифицированный глютен приводит к значительному улучшению механических характеристик.

Исследования показывают, что добавление волокон конопли и древесины увеличивает прочность на разрыв и модуль Юнга, хотя и снижает относительное удлинение при разрыве [9].

Наиболее высокие показатели прочности достигаются при использовании однонаправленных льняных волокон. Методом препреговой технологии с последующим компрессионным формованием получены композиты с изгибным модулем 12 ГПа, прочностью 117 МПа и деформацией при разрушении около 1,3 % при объемной доле волокна 35 % [8, 14].

Примечательно, что в отсутствие пластификатора или при его низких концентрациях высокотемпературное компрессионное формование глютена позволяет получить жесткие стеклообразные материалы с модулем упругости около 3,8 ГПа и прочностью 47 МПа, сопоставимые со свойствами эпоксидных смол [15, 16].

Демпфирующие свойства композитов на основе глютена исследованы в меньшей степени, однако имеющиеся данные свидетельствуют о возможности создания материалов с высокими вязкоупругими характеристиками. Полученные смеси по работе разрушения и прочности существенно превосходят полистирол, сохраняя изгибную жесткость выше 3 ГПа [7]. Этот подход открывает возможности для создания демпфирующих композитов на основе глютена, которые могут найти применение в вибро- и звукоизоляции.

Ряд авторов также отмечает, что глютеносодержащие материалы обладают звукопоглощающими свойствами [18]. Пенокомпозиты на основе глютена, благодаря своей пористой структуре, могут проявлять улучшенные демпфирующие характеристики. Пенообразные материалы на основе глютена, полученные различными методами (расширение в печи, компрессионное формование и экструзия), демонстрируют плотность около 400 кг/м³ с однородным распределением пор по размерам [18].

Высокая гидрофильность глютена является одним из основных ограничений для его практического применения [6, 7]. Биокompозитные материалы, содержащие компоненты природного происхождения, обладают низкой стойкостью к водопоглощению, что приводит к быстрому разрушению изделий в условиях повышенной влажности [19]. Водопоглощение пенокомпозитов на основе глютена может достигать 110...270 % [20].

Для снижения водопоглощения применяются несколько стратегий. Химическая модификация с помощью сшивающих агентов (лимонная кислота, экстракт лимона, танины, эпоксицианированное соевое масло) увеличивает плотность сшивки белковых цепей, уменьшая проникновение воды [9]. Добавление гидрофобных наполнителей также уменьшает водопоглощение: введение 6 мас. % угля из глютена снижает водопоглощение на 38 %. Введение органоглины (Cloisite 30B) в глютеносодержащую матрицу методом литья из раствора улучшает барьерные свойства и повышает гидрофобность поверхности [21].

Значительного улучшения гидрофобности удалось достичь при введении гидрофобных добавок. Использование олифы «Оксол» в оптимальном количестве обеспечило увеличение прочности на сжатие на 12...15 % по сравнению с немодифицированными биокompозитными материалами [19]. Введение 4 мас. ч. парафина на 100 мас. ч. биополимерной матрицы увеличило прочность на сжатие в 2,8...4,6 раза. Применение защитных гидрофобных покрытий на основе раствора парафина обеспечило снижение водопоглощения на 45...50 % по сравнению с покрытиями на основе воска, олифы Оксол и подсолнечного масла [22].

Введение липидов (например, олеиновой кислоты) в пластификатор (глицерин) позволяет снизить скорость пропускания водяного пара и водопоглощение в 1,5...3 раза [23]. Введение 15 % пчелиного воска в композитную пленку на основе глютена обеспечило наименьшую скорость пропускания водяного пара

($0,76 \cdot 10^{-12}$ г/см·с·Па) и наибольший краевой угол смачивания ($86,18^\circ$) [20].

Ключевым преимуществом глютенных композитов является их способность к полной биодegradации [8, 21]. Продолжительность деградации варьируется в зависимости от состава и технологии получения: от 9 суток для экструдированной глютенной пленки до 30 суток для литьевого композита и до 180 суток для композитов, полученных компрессионным формованием [9]. Неармированный глютен разлагается в почве в течение 50 дней, а композиты с волокнами конопли полностью деградируют через 180 дней в условиях фермерской почвы [8].

Важно отметить, что продукты деградации нетоксичны для растений: при выращивании газонной травы на почве с захороненными фрагментами композитов не наблюдалось зон отчуждения, а всхожесть и рост растений не отличались от контрольных образцов.

Компрессионное формование является наиболее распространенным методом получения жестких глютенных композитов [7, 10]. Процесс включает прессование смеси глютена и волокон при температуре $100...130^\circ\text{C}$ под давлением. Исследования показывают, что повышение температуры формования с 110 до 130°C способствует образованию межмолекулярных дисульфидных связей между белковыми цепями, что увеличивает максимальное напряжение композита [10].

Для получения композитов с однонаправленным армированием разработана препреговая технология, включающая сухое расчесывание волокон, увлажнение для повышения прямолинейности, нанесение порошка глютена на поверхность волокон и последующее компрессионное формование [14]. В «сухом» методе смешивают порошкообразный глютен и волокна, после чего формуют под давлением. «Мокрый» метод, в котором используется водно-этанольный раствор для частичного растворения глютена, обеспечивает наилучшее смачивание волокон и значительно повышает механические свойства композитов [8].

Экструзия является промышленно приемлемым методом получения глютенных биопластиков. Важной особенностью является возможность водной экструзии при низких температурах ($70...90^\circ\text{C}$), что позволяет сохранить длину армирующих волокон и снизить энергозатраты.

Температура экструзии критически влияет на распределение волокон: повышение температуры приводит к увеличению сдвиговых напряжений вследствие сшивки глютена, что способ-

ствует лучшему диспергированию волокон, но одновременно уменьшает их среднюю длину [9].

Показана принципиальная возможность использования глютенных композитов для 3D-печати. Гибридные составы глютен/кератин продемонстрировали возможность послойной печати с точностью более 92 % для 10-слойной конструкции [11]. Это открывает новые возможности для создания изделий сложной геометрии с заданными свойствами.

Наиболее широко исследуемой областью является производство упаковок [24].

Мягкая (гибкая) упаковка – это пленки, обертки и пакеты, которые должны быть эластичными и часто прозрачными. Основным методом их получения является литье растворов, позволяющее получать тонкие гибкие пленки. Глютенные пленки не просто упаковывают продукт, а могут активно продлевать его свежесть. Они служат эффективной основой для «активной» и «интеллектуальной» упаковки [9].

Глютенные композиты также предлагаются в качестве альтернативы одноразовым пластиковым изделиям. Пенокомпозиты на основе глютена с добавлением различных волокон (ваточника, конопли, хлопка) демонстрируют улучшенные механические свойства и могут быть использованы в качестве легких упаковочных материалов.

Из глютенных композитов изготавливают биоразлагаемые горшки для рассады, лотки для образцов, поддоны для выращивания растений, которые после использования могут быть закопаны в почву [18]. Продemonстрирована возможность создания полностью биоразлагаемых лотков для рассады и других изделий с коротким сроком службы, которые могут быть высажены в грунт вместе с растением. Корни прорастают сквозь стенки горшка, а сам горшок служит удобрением.

Другим направлением использования биодegradуемых композитов является мульчируемая пленка. Такая пленка помогает сохранять влагу, подавлять сорняки и регулировать температуру почвы. После сбора урожая пленку можно просто запахать в землю, где она продолжит разлагаться, не загрязняя поле пластиком [18].

Биокомпозитные материалы постепенно вытесняют синтетические полимеры в автомобилестроении для внутренней отделки салонов. Армированные натуральными волокнами композиты на основе биоразлагаемых связующих рассматриваются как экологичная альтернатива традиционным материалам, особенно для деталей, не подвергающихся высоким нагрузкам [9].

Разработаны биоразлагаемые потолочные панели на основе волокон агавы и глютена. При соотношении волокно/глютен 60/40 % прочность на разрыв составила 49 МПа, а прочность на изгиб – 60 МПа, что значительно превосходит показатели коммерческих панелей из минеральных волокон (8 и 17 МПа соответственно). Пропитка картона биомодифицированным глютенем увеличивает прочностные и деформационные характеристики: растяжимость возрастает до 29 %, жесткость – до 96 %, разрушающая нагрузка – до 54 %, а влажпрочность – до 54 % по сравнению с контрольным образцом [4].

Композиты предлагаются для производства ватных палочек, носовых тампонов, а также в качестве материалов для тканевой инженерии и систем доставки лекарств. Пенокомпозиты могут применяться для создания одноразовых санитарно-гигиенических изделий. Глютеновые пеноматериалы, полученные из нетоксичных компонентов, показали способность поглощать в 3–4 раза больше собственного веса, что позволяет использовать их в качестве абсорбентов в одноразовых санитарных изделиях.

Композиционные материалы на основе глютеневой матрицы (как растительного, так и животного происхождения), армированные натуральными волокнами, представляют собой перспективный класс полностью биоразлагаемых и компостируемых материалов из возобновляемого сырья.

ВЫВОДЫ

1. Прочностные и упругие свойства. Армирование глютеневой матрицы натуральными волокнами (льняными, конопляными, джутовыми, банановыми и др.) позволяет достичь предела прочности до 117 МПа и модуля упругости до 12 ГПа при однонаправленном армировании.

2. Демпфирующие свойства: при введении специальных сшивателей можно достичь высокого демпфирования, вязкости разрушения и прочности [18]. Пенокомпозиты на основе глютена проявляют улучшенные звукопогло-

щающие характеристики благодаря пористой структуре.

3. Водостойкость. Водопоглощение остается существенным ограничением. Для его снижения применяют введение гидрофобных наполнителей (парафин, воск, олифа), использование гидрофобных покрытий, химическую модификацию и создание многослойных структур [19, 23]. Введение 4 мас. ч. парафина увеличивает прочность на сжатие в 2,8...4,6 раза и снижает водопоглощение на 45...50 %.

4. Биоразлагаемость. Глютеновые композиты демонстрируют полную биоразлагаемость в почвенных условиях и в компосте. Время полной деградации составляет от 26 дней для пенокомпозитов до 180 дней для армированных композитов [8]. Композиты на основе желатина могут терять более 50 % массы за 24 часа [13].

5. Технологии. Основными методами получения являются компрессионное формование (горячее прессование), экструзия с последующим литьем под давлением и 3D-печать [7, 9, 10, 11]. Экструзия при низких температурах (70...90 °С) позволяет сохранить длину армирующих волокон и снизить энергозатраты [9].

6. Применение. Основные области применения включают упаковочные материалы (в том числе активные и интеллектуальные), компоненты автомобильного интерьера, строительные материалы, медицинские изделия (скаффолды для тканевой инженерии, раневые повязки) и одноразовые санитарно-гигиенические изделия [18, 21].

Дальнейшие исследования должны быть направлены на улучшение влагостойкости, оптимизацию технологических режимов, масштабирование производства и разработку гибридных композитов на основе смеси растительных и животных белков для достижения синергетического эффекта [11]. Коммерциализация глютен-волоконистых композитов может внести существенный вклад в снижение загрязнения окружающей среды пластиковыми отходами и сокращение зависимости от ископаемого углеродородного сырья [9, 24].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колпакова В. В., Усачев И. С., Соломин Д. А. Биоразлагаемые полимеры: составные биокомпоненты и технологические решения производства // Пищевая промышленность. 2019. № 12. С. 51–57.
2. Наумова Л. Н., Лобанова Э. Р. Волокнистые полимерные композиционные материалы // Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды : сб. докладов II Междунар. науч.-техн. конф., 06–08 декабря 2016 г. / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2016. С. 27–30.

3. Тасекеев М. С., Еремеева Л. М. Производство биополимеров как один из путей решения проблем экологии и АПК. Аналитический обзор. Алматы : НЦ НТИ, 2009. 200 с.
4. Redondo-Gómez C., Rodríguez Q., Rojas O. J. Proteins from Agri-Food Industrial Biowastes or Co-Products and Their Applications as Green Materials // *Foods*. 2021. Vol. 10, No. 5. P. 981.
5. Biobased composites from agro-industrial wastes and by-products / J. F. Mendes, L. B. Norcino, H. H. A. Martins [et al.] // *Emergent Materials*. 2021. Vol. 5, No. 3. P. 873–921.
6. Green composites based on wheat gluten matrix and *Posidonia oceanica* waste fibers as reinforcements / B. Ferrero, T. Boronat, R. Moriana, O. Fenollar // *Polymer Composites*. 2013. Vol. 34, No. 10. P. 1663–1669.
7. Reinforcement of plasticized wheat gluten with natural fibers: From mechanical improvement to deplasticizing effect / T. Kunanopparat, P. Menut, M. H. Morel, S. Guilbert // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008. Vol. 39, No. 5. P. 777–785.
8. Preparation, properties, protein cross-linking and biodegradability of plasticizer-solvent free hemp fibre reinforced wheat gluten, glutenin, and gliadin composites/ F. Muneer, E. Johansson, M. S. Hedenqvist [et al.] // *BioResources*. 2014. Vol. 9, No. 3. P. 5246–5261.
9. Biodegradable Fiber-Reinforced Gluten Biocomposites for Replacement of Fossil-Based Plastics / A. J. Capezza, M. Bettelli, X. Wei [et al.] // *ACS Omega*. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 1341–1351.
10. Plasticized wheat gluten reinforcement with natural fibers: Effect of thermal treatment on the fiber/matrix adhesion / T. Kunanopparat, P. Menut, M. H. Morel, S. Guilbert // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008. Vol. 39, No. 12. P. 1787–1792.
11. Renewable proteins from agricultural and animal sources as innovative multifunctional bio-fillers for rubber composites: A comprehensive review / M. Alagia, B. La Ferla, L. Zoia, F. Peri // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 284, Part 1. Article 137941.
12. Ibrahim S., Elsayed H. M., Hasanin M. Biodegradable, Antimicrobial and Antioxidant Biofilm for Active Packaging Based on Extracted Gelatin and Lignocelluloses Biowastes // *Journal of Polymers and the Environment*. 2021. Vol. 29, No. 3. P. 1–11.
13. Shubhra Q. T. H., Alam A., Beg M. D. H. Mechanical and degradation characteristics of natural silk fiber reinforced gelatin composites // *Materials Letters*. 2011. Vol. 65, No. 2. P. 333–336.
14. Preparation of biocomposites based on gluten resin and unidirectional flax fibers / N. Vo Hong, P. Van Puyvelde, A. W. Van Vuure, I. Verpoest // *Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials (ECCM-15)*. Venice, 2012.
15. Flexible strength-improved and crack-resistant biocomposites based on plasticised wheat gluten reinforced with a flax-fibre-weave / W. R. Newson, R. Kuktaite, M. S. Hedenqvist et al. // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017. Vol. 94. P. 1–8.
16. Effect of electron beam irradiation on mechanical properties of gelatin/Brazil nut shell fiber composites / P. Y. Inamura, K. Shimazaki, M. A. Colombo [et al.] // *Revista Matéria*. 2010. Vol. 15, No. 2. P. 380–385.
17. Diao C., Xia H., Parnas R. S. Wheat Gluten Blends with Maleic Anhydride-Functionalized Polyacrylate Cross-Linkers for Improved Properties // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015. Vol. 7, No. 40. P. 22601–22609.
18. Advances in Biodegradable Food Packaging Using Wheat-Based Materials: Fabrications and Innovations, Applications, Potentials, and Challenges / R. S. Alibekov, K. U. Urazbayeva, A. M. Azimov [et al.] // *Foods*. 2024. Vol. 13, No. 18. P. 2964.
19. Kashytskyi V., Sadova O., Shehynskyi V. The development of gluten-based biocomposite materials with advanced hydrophobicity // *Товарознавчий вісник*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 27–35.
20. Incorporation of Lipids into Wheat Bran Cellulose/Wheat Gluten Composite Film Improves Its Water Resistance Properties / G. Shen, G. Yu, H. Wu [et al.] // *Membranes*. 2022. Vol. 12, No. 1. P. 18.
21. Shreya S., Niranjana D., Bonamali P. Biodegradable wheat gluten/nanoclay-based bionanocomposite films for assessing the potential as a packaging material // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025. Vol. 15. P. 25045–25062.
22. Шегинський В. О. Модифікація глютеинових біокомпозитних матеріалів гідрофобними добавками // *Наукові нотатки*. 2024. № 77. doi:10.36910/775.24153966.2024.77.24.
23. Wheat Gluten-Laminated Paperboard with Improved Moisture Barrier Properties: A New Concept Using a Plasticizer (Glycerol) Containing a Hydrophobic Component (Oleic Acid) / S.-W. Cho, T. O. J. Blomfeldt, H. Halonen [et al.] // *International Journal of Polymer Science*. 2012. Vol. 9. doi:10.1155/2012/454359.

24. Recent Advances in Gluten-Based Active and Intelligent Food Packaging: A Review // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2025. Vol. 24, No. 5

REFERENCES

1. Kolpakova V. V., Usachev I. S., Solomin D. A. Biodegradable polymers: compound biocomponents and manufacturing technological solutions. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry]. 2019;12:51–57. (In Russ.)
2. Naumova L. N., Lobanova E. R. Fibrous polymer composite materials. *Energo- i resursosberegayushchie ekologicheski chistye himiko-tekhnologicheskie process zashchity okruzhayushchej sredy* [Energy- and resource-saving environmentally friendly chemical-technological processes of environmental protection: proceedings of the II International scientific and technical conference. Belgorod, BSTU im. V. G. Shukhov Publ., 2016. P. 27–30. (In Russ.)
3. Tasekeev M. S., Eremeeva L. M. Polymer production as one of the ways to solve environmental and agricultural problems. *Analytical review*. Almaty, 2009. 200 p. (In Russ.)
4. Redondo-Gomez C., Rodríguez Q., Rojas O. J. Proteins from Agri-Food Industrial Biowastes or Co-Products and Their Applications as Green Materials. *Foods*. 2021;10(5):981.
5. Mendes J. F., Norcino L. B., Martins H. H. A. et al. Biobased composites from agro-industrial wastes and by-products. *Emergent Materials*. 2021;5(3):873–921.
6. Ferrero B., Boronat T., Moriana R., Fenollar O. Green composites based on wheat gluten matrix and *Posidonia oceanica* waste fibers as reinforcements. *Polymer Composites*. 2013;34(10):1663–1669.
7. Kunanopparat T., Menut P., Morel M. H., Guilbert S. Reinforcement of plasticized wheat gluten with natural fibers: From mechanical improvement to deplasticizing effect. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008;39(5):777–785.
8. Muneer F., Johansson E., Hedenqvist M. S. et al. Preparation, properties, protein cross-linking and biodegradability of plasticizer-solvent free hemp fibre reinforced wheat gluten, glutenin, and gliadin composites. *BioResources*. 2014;9(3):5246–5261.
9. Capezza A. J., Bettelli M., Wei X. et al. Biodegradable Fiber-Reinforced Gluten Biocomposites for Replacement of Fossil-Based Plastics. *ACS Omega*. 2023;9(1):1341–1351.
10. Kunanopparat T., Menut P., Morel M. H., Guilbert S. Plasticized wheat gluten reinforcement with natural fibers: Effect of thermal treatment on the fiber/matrix adhesion. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2008;39(12):1787–1792.
11. Alagia M., La Ferla B., Zoia L., Peri F. Renewable proteins from agricultural and animal sources as innovative multifunctional bio-fillers for rubber composites: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;284(1):137941.
12. Ibrahim S., Elsayed H. M., Hasanin M. Biodegradable, Antimicrobial and Antioxidant Biofilm for Active Packaging Based on Extracted Gelatin and Lignocelluloses Biowastes. *Journal of Polymers and the Environment*. 2021;29(3):1–11.
13. Shubhra Q. T. H., Alam A., Beg M. D. H. Mechanical and degradation characteristics of natural silk fiber reinforced gelatin composites. *Materials Letters*. 2011;65(2):333–336.
14. Hong N. Vo, Van Puyvelde P., Van Vuure A. W., Verpoest I. Preparation of biocomposites based on gluten resin and unidirectional flax fibers. *Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials (ECCM-15)*. Venice, 2012.
15. Newson W. R., Kuktaite R., Hedenqvist M. S. et al. Flexible strength-improved and crack-resistant biocomposites based on plasticised wheat gluten reinforced with a flax-fibre-weave. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017;94:1–8.
16. Inamura P. Y., Shimazaki K., Colombo M. A. et al Effect of electron beam irradiation on mechanical properties of gelatin/Brazil nut shell fiber composites. *Revista Materia*. 2010;15(2):380–385.
17. Diao C., Xia H., Parnas R. S. Wheat Gluten Blends with Maleic Anhydride-Functionalized Polyacrylate Cross-Linkers for Improved Properties. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015;7(40):22601–22609.
18. Alibekov R. S., Urazbayeva K. U., Azimov A. M. et al. Advances in Biodegradable Food Packaging Using Wheat-Based Materials: Fabrications and Innovations, Applications, Potentials, and Challenges. *Foods*. 2024;13(18):2964.
19. Kashytskiy V., Sadova O., Shehynskiy V. The development of gluten-based biocomposite materials with advanced hydrophobicity. *Tovarovnavchij visnik* [Commodity Bulletin]. 2024;17(1):27–35.
20. Shen G., Yu G., Wu H. et al. Incorporation of Lipids into Wheat Bran Cellulose/Wheat Gluten Composite Film Improves Its Water Resistance Properties. *Membranes*. 2021; 12(1):18

21. Shreya S., Niranjana D., Bonamali P. Biodegradable wheat gluten/nanoclay-based bionanocomposite films for assessing the potential as a packaging material. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2025;15:25045–25062.
22. Shehynskiy V. Modification of Glutinin Based Biocomposite Materials with Hydrophobic Additives. *Naukovi notatky* [Scientific Notes]. 2024;77. doi:10.36910/775.24153966.2024.77.24.
23. Cho S.-W., Blomfeldt T. O. J., Halonen H. et al. Wheat Gluten-Laminated Paperboard with Improved Moisture Barrier Properties: A New Concept Using a Plasticizer (Glycerol) Containing a Hydrophobic Component (Oleic Acid). *International Journal of Polymer Science*. 2012;9. doi:10.1155/2012/454359.
24. Recent Advances in Gluten-Based Active and Intelligent Food Packaging: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2025;24(5).

Статья поступила в редакцию 22.04.2026

Принята к публикации 27.04.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

П. Н. Рудовский, доктор технических наук, профессор

С. Г. Смирнова, кандидат технических наук, доцент

А. Ю. Смирнов, магистрант