

УДК 676.2:678.5

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ КРАФТ-КАРТОНА ВОДОЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ ИЗ АГАР-АГАРА

© *Л.Р. Галеева*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, 68, Казань, 420015, Россия,
L.musina@yandex.ru*

В статье предложен новый упаковочный материал сельскохозяйственной продукции на основе крафт-картона с поверхностной обработкой барьерным биоразлагаемым покрытием из агар-агара. В ходе работы выбраны оптимальные концентрации водных растворов (в диапазоне 2–3%) агар-агара для нанесения на картон. Определены реологические характеристики водного раствора полимера для концентраций: 1, 2, 3%. Выявлено, что с увеличением концентрации раствора агар-агара происходит уменьшение поверхностной впитываемости капельным способом за счет миграции большей доли макромолекул полимера в приповерхностные слои картона и, как следствие, снижения пористости материала. Полимерное покрытие также выполняет водозащитные функции, на ~40% снижая впитываемость крафт-картона при полном погружении, которая не зависит от концентрации раствора полимера. Показано уменьшение эластичности материала при воздействии изгибающих нагрузок с возрастанием толщины покрытия из агар-агара. Достигнутые результаты увеличения водозащитных свойств крафт-картона показали высокую эффективность применения агар-агара в качестве поверхностного защитного покрытия.

Ключевые слова: крафт-картон, биоразлагаемый полимер, агар-агар, вязкость, сорбционные свойства, впитываемость, изгиб.

Для цитирования: Галеева Л.Р. Модификация поверхности крафт-картона водозащитным покрытием из агар-агара // Химия растительного сырья. 2026. №1. С. 371–378. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117007>.

Введение

Одним из наиболее востребованных материалов в производстве тары и упаковки является картон [1]. Пищевая промышленность, электроника, обувная и легкая промышленности, строительство – это далеко не полный перечень потребителей, благодаря которым рынок производства и переработки картонов интенсивно развивается. Наряду с преимуществами (низкая себестоимость, высокая удельная прочность, экологичность и др.) картон имеет ряд существенных недостатков, главным из которых считается низкая влагопрочность. Наличие гидроксильных групп в макромолекулах целлюлозы обуславливает высокую гигроскопичность целлюлозно-бумажных материалов, т. е. при контакте с водой они набухают и становятся значительно менее прочными [2]. В связи с этим актуальным является вопрос повышения гидрофобности этого материала.

Эффективными решениями для упаковки продуктов и товаров, которым требуется защита от влаги, загрязнений и механических воздействий (в том числе сельскохозяйственной продукции, продуктов питания), являются такие способы обработки бумаги и картона, как проклейка в массу, поверхностная проклейка, нанесение полимерного покрытия (ламинирование) [3–10].

Если речь идет о готовом листовом материале или изделии из него (пакете, коробке), то наиболее приемлемыми способами повышения их гидрофобности являются поверхностная проклейка или ламинирование. Одновременно использование этих способов может привести к улучшению прочностных характеристик и иногда – печатных показателей [11–15]. С точки зрения простоты оборудования, экономии энергозатрат выгодно использовать поверхностную проклейку бумаги и картона, для которой, как правило, используют растворы природных и синтетических полимеров. Полимерное покрытие повышает прочность, водонепроницаемость и устойчивость гофротары, что делает ее универсальным и экономически выгодным вариантом упаковки. С развитием технологий и повышением интереса к экологической устойчивости гофротара с природным полимерным покрытием имеет потенциал стать предпочтительным выбором в будущем.

В случае применения покрытия из традиционных синтетических полимеров (полиэтилен, полипропилен, поливинилиденхлорид и т.п.) теряется одно из самых главных преимуществ целлюлозно-бумажных материалов – биоразлагаемость и/или возможность вторичной переработки. В работе [16] в качестве покрытий, препятствующих проникновению воды в структуру крафт-картона, были использованы ряд биоразлагаемых полимеров, в том числе агар-агар. Агар-агар относится к классу полисахаридов и является биоразлагаемым полимером [17, 18]. Гели агар-агара используются в качестве питательных сред для бактерий и грибов. Этот биополимер пока не нашел широкого использования в качестве упаковочного материала или покрытия для бумаги и картона, но, представляется, может стать весьма перспективным для производства влагопрочных, экологически безопасных целлюлозно-бумажных материалов в промышленных масштабах [19–21].

Таким образом, целью данной работы является нанесение покрытие из агар-агара на картон изучение стойкости к действию воды исходного картона и полученных двухслойных материал.

Экспериментальная часть

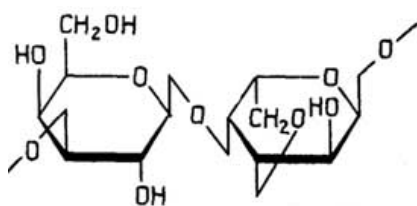


Рис. 1. Химическая формула агар-агара

В качестве объекта исследования был выбран крафт-картон (СТО 05711131-05-2013). Крафт-картон представляет собой материал, как правило, состоящий из нескольких слоев, выработанный как из первичного, так и вторичного сырья. В качестве покрытия был использован агар-агар (АА) (ГОСТ 16280-2002), химической формулы (рис. 1). Агар-агар состоит из смеси двух полисахаридов: агарозы и агаропектина, причем агароза составляет около 70% смеси, а агаропектин – около 30%. Агароза представляет собой линейный полимер, состоящий из повторяющихся звеньев агаробиозы, дисахарида, состоящего из D-галактозы и 3,6-ангидро-L-галактопиранозы. Агаропектин представляет собой гетерогенную смесь молекул меньшего размера, которые встречаются в меньших количествах, и состоит из чередующихся звеньев D-галактозы и L-галактозы, сильно модифицированных кислотными боковыми группами, такими как сульфат, глюкуронат и пируват [22, 23].

Агар-агар представляет собой желтовато-белый порошок. Полностью растворяется в воде при температуре выше 90 °С, образуя прозрачный, вязкий раствор, который при охлаждении до температуры 35–40 °С переходит в гелеобразное состояние [24].

Для нанесения покрытий на поверхность крафт-картона приготавливались растворы с различным соотношением «вода: агар-агар» (0.5–5.0% растворы). В воду при температуре 60–65 °С добавляли расчетное количество агар-агар, соответствующее концентрации приготавливаемых водных растворов, оставляли на 15 мин для набухания, далее водный раствор агар-агар кипятили в течение 2 мин, исходя из требований инструкции.

Вязкость водных растворов агар-агара определяли на вискозиметре ВЗ-4 при начальной температуре раствора 45–75 °С по ГОСТ 9070-75.

Нанесение покрытий на поверхность крафт-картона размерами 200×200 мм осуществляли с помощью кисти и распылением из пульверизатора, после чего образцы оставляли под вытяжным шкафом в ограничительной рамке (для предотвращения деформации материала) для удаления воды испарением. Перед испытаниями данные материалы нарезались на образцы необходимых размеров.

Толщину образцов (исходного крафт-картона, крафт-картона с покрытием) определяли с помощью микрометра ТИП МК25-1 как среднее арифметическое измерений не менее чем в пяти точках. Определение эластичности покрытия из агар-агара при изгибе проводилось по ГОСТ 6806-73.

Определение поверхностной впитываемости капельным способом осуществляли по ГОСТ 12603-67, определение впитываемости при полном погружении определяли по ГОСТ 13648.

Все эксперименты повторяли не менее чем 10 раз. Ошибка эксперимента не превышала 5%.

Обсуждение результатов

Толщину полимерного покрытия, наносимого на картон из раствора, можно изменять, используя водные растворы агар-агара различных концентраций. При нанесении покрытий сделали также следующие

наблюдения. При содержании агар-агара в водном растворе 0.5–2% его возможно наносить на поверхность картона с помощью пульверизатора. Покрытия при этом получаются достаточно равномерными по толщине. При концентрации агар-агара в растворе больше 2% его вязкость выросла настолько, что наносить покрытие с помощью пульверизатора не представлялось возможным (табл.). Кистью возможно нанести покрытия из водных растворов любой из исследуемых концентраций, но если концентрация агар-агара в воде превышала 3%, то покрытия получались очень неровными, с явно прослеживаемыми следами от кисти.

Очевидно, такое различие связано с ростом значений вязкости растворов. Для сравнения реологических характеристик водных растворов агар-агара была измерена их условная вязкость – сразу после приготовления раствора (при температуре раствора 75 °С) и по истечении 7 мин (при температуре раствора 45 °С). Видно (табл.), что с ростом концентрации водного раствора время его вытекания из вискозиметра ВЗ-4 возрастает (т.е. текучесть снижается), причем для раствора с концентрацией агар-агара 3% определить вязкость по истечению времени не представлялось возможным из-за перехода раствора в гелеобразное состояние. Это вполне ожидаемо, так как известно, что особенностью растворов полимеров в отличие от растворов низкомолекулярных жидкостей является их высокая вязкость, которая обусловлена высокой вязкостью самих полимеров. При изготовлении растворов полимеров вязкость растворителя может изменяться на 2–6 порядков.

Таким образом, с точки зрения методики нанесения покрытий оптимальная концентрация агар-агара в водном растворе находится в диапазоне 2–3% (2% раствор – для нанесения пульверизатором и 3% – для нанесения кистью).

После пропитки крафт-картона раствором агар-агара на его поверхности образуется покрытие, эластичность которого была определена при изгибе образцов в течение 1–2 с на 180° вокруг металлических стержней различного диаметра. Образцы картона без покрытия и с покрытием, нанесенном с помощью кисти, визуально оценивали до и после изгиба на предмет образования трещин и отслаивания (рис. 2).

Эластичность картона на изгиб в первую очередь зависит от гибкости волокон. При исследовании поверхности исходных образцов видно, что изгиб образцов привел к нарушению поверхностного слоя картона, но наличия трещин не наблюдается. Изгиб обработанных образцов также не привел к образованию трещин на поверхности образцов, но следует отметить, что площадь повреждения поверхностного слоя выше, чем у исходных образцов, а глубина деформаций слоя – ниже. То есть произошла диссипация деформаций по площади образцов, что приводит к увеличению сопротивления изгибу картона. Это можно объяснить увеличением прочности поверхностного слоя картона за счет того, что агар-агар начинает выполнять роль связующего, перераспределяя нагрузку между целлюлозными волокнами в поверхностном слое картона. В силу одинаковой природы волокон картона и агар-агара, адгезия между ними хорошая (согласно молекулярной теории адгезии) и обуславливается возникновением межмолекулярных водородных связей.

После нанесения покрытий из 0.5–5.0% растворов агар-агара в воде одинакового объема толщина образцов ожидаемо изменилась (рис. 3).

Нетрудно заметить, что концентрация раствора агар-агара и толщина образующихся покрытий не находятся в прямой зависимости. Например, если сравнивать покрытия, полученные из 0.5 и 1% растворов полимера, можно констатировать: двукратное увеличение концентрации агар-агара не ведет к двукратному увеличению толщины покрытия (хотя наносимое количество полимера в 2 раз больше). То же самое наблюдается, если сравнивать покрытия, образованные нанесением 0.5 и 5.0% растворов агар-агара на картон – десятикратного увеличения толщины покрытия не происходит. Это означает, что не весь полимер образует покрытие – часть макромолекул агар-агара мигрирует в объем картона, заполняя межволоконное пространство.

Это должно оказывать влияние и на сорбционные показатели полученных материалов. Учитывая вышеописанные отличия в методиках нанесения растворов агар-агара различных концентраций, измерения сорбционных свойств проводили только для исходного крафт-картона и крафт-картона с покрытиями, полученных из 1, 2 и 3% (при нанесении кистью) водных растворов агар-агара.

Показатели условной вязкости для различных концентраций раствора агар-агара

Наименование показателя	Вода	Концентрация раствора агар-агар, %		
		1	2	3
Условная вязкость сразу после приготовления раствора, сек	10	10.4	11	14
Условная вязкость после истечения 7 мин после приготовления, сек	10	10.8	16	–

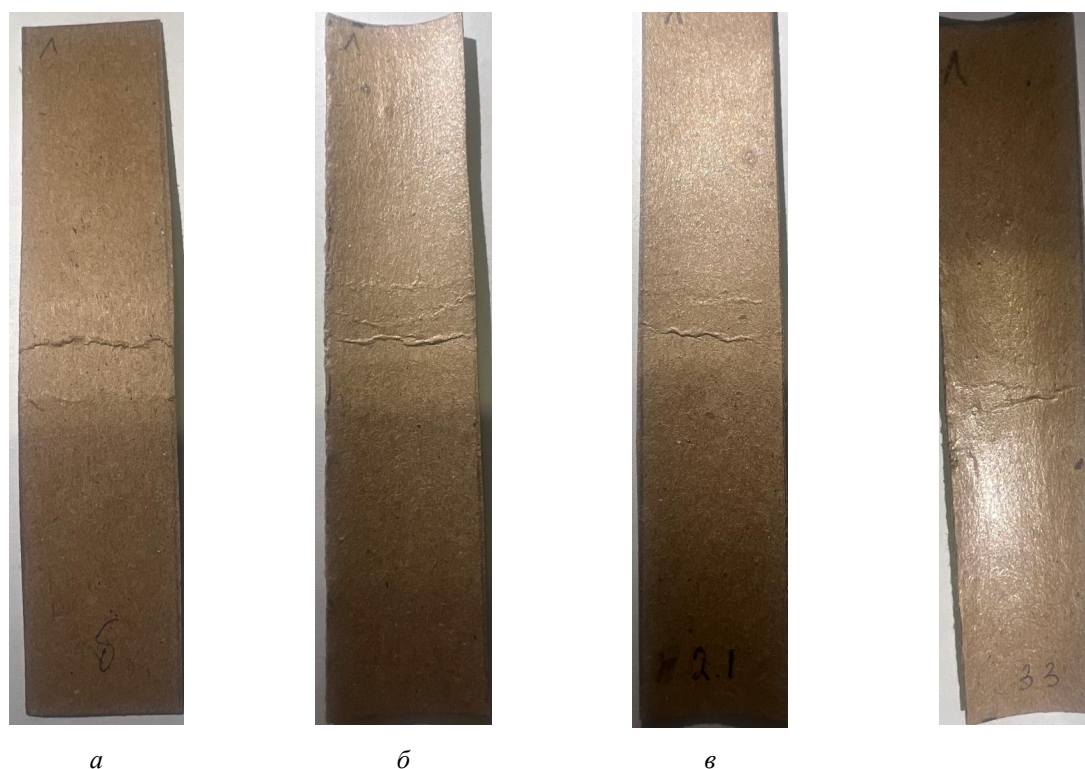


Рис. 2. Фотографии поверхности крафт-картона и крафт-картона с покрытием из агар-агара после изгиба вокруг стержня диаметром 10 мм. *а* – крафт-картон, *б* – крафт-картон с покрытием из 1% водного раствора агар-агара, *в* – крафт-картон с покрытием из 2% водного раствора агар-агара, *г* – крафт-картон с покрытием из 3% водного раствора агар-агара

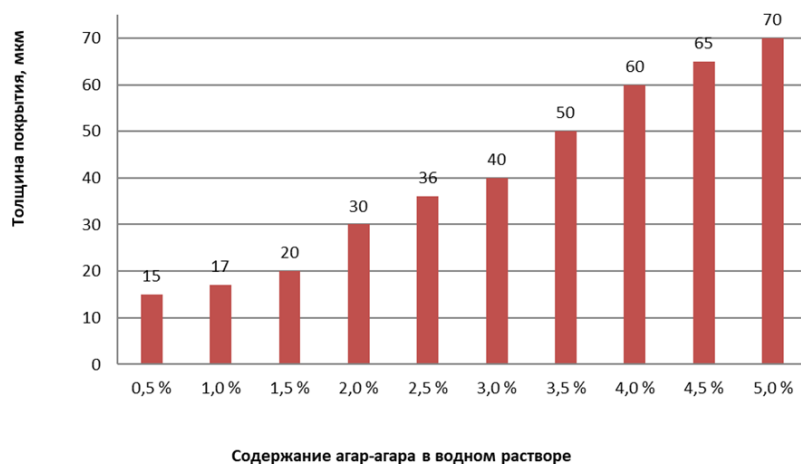


Рис. 3. Толщина покрытий из агар-агара на крафт-картоне при использовании водных растворов полимера различных концентраций

Исследования изучаемых образцов на впитываемость капельным методом (рис. 4) показали, что покрытие крафт-картона агар-агаром положительным образом сказывается на его барьерных свойствах (по отношению к воде).

Повышения значений впитываемости (т.е. замедление кинетики сорбции воды в структуру картона) различных образцов говорит об эффективности действия покрытий из агар-агара, несмотря на то что по природе этот полимер является гидрофильным полисахаридом. При пропитке крафт-картона раствором агар-агара на его поверхности образуется покрытие, значительно замедляющее проникновение молекул воды в объем картона. При формировании покрытия на поверхности картона происходит частичная миграция макромолекул полимера в приповерхностные слои материала (межволоконное пространство, внешние и внутренние поры). Это приводит к уменьшению пористости крафт-картона и, следовательно, к замедлению сорбции воды.



Рис. 4. Влияние концентрации раствора агар-агара на поверхности картона на изменение впитывающей способности капельным методом

Исследование образцов на впитываемость при полном погружении показало следующее. Впитываемость крафт-картона при полном погружении составило 61%. При погружении картона в воду на первом этапе происходит смачивание поверхности материала водой за счет капиллярных сил (абсорбция). Капиллярные силы между водой и поверхностью картона возникают из-за притяжения их молекул. Благодаря этому происходит растекание воды по всей поверхности образцов. Течение воды в структуре листа протекает по межволоконному и внутриволоконному механизмам. Межволоконный механизм проникновения воды подчиняется законам капиллярной физики, а межволоконное проникновение зависит от числа контактов между волокнами. Чем больше этих контактов, тем более быстрое движение воды в структуре листа.

При нанесении покрытия из водных растворов агар-агара различных концентраций (1, 2 и 3%) кистью значения впитываемости при полном погружении уменьшается до 39–41%. Снижение впитывающей способности происходит из-за защитного действия поверхностного покрытия из агар-агара, которое препятствует прохождению воды через его толщину. Смачивание необработанной стороны листа протекает по вышеописанному механизму. Заметной разницы по впитыванию воды при нанесении покрытий различной толщины не наблюдается (находятся в пределах 39–41%), так как при данном испытании вода не только смачивает поверхность картона, как при капельной впитываемости, но и проникает в структуру картона. При этом смачиванию водой подвергаются как обработанная, так и не обработанная сторона картона.

Выводы

Установлена целесообразность применения агар-агара в качестве защитного барьерного покрытия при поверхностной обработке крафт-картона.

С точки зрения методики нанесения покрытий оптимальная концентрация агар-агара в водном растворе варьируется в диапазоне 2–3% (2% раствор – для нанесения пульверизатором и 3% – для нанесения кистью).

Получена зависимость концентрации раствора агар-агара при смачивании крафт-картона с поверхностной обработкой. Для 1%-ного раствора агар-агара снижение впитываемости возросло в 4 раза, с увеличением концентрации агар-агара до 3% снижение впитываемости увеличилось в 28 раз. Уменьшение впитываемости объясняется образованием на поверхности картона защитного покрытия, действие которого распространяется и на приповерхностные слои материала.

Подтверждение снижения сорбционных свойств показано и на примере впитываемости крафт-картона при полном погружении на 61%, для крафт-картона с поверхностной обработкой на 39–41% – в зависимости от концентрации раствора.

Финансирование

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Конфликт интересов

Автор данной работы заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Панова Я.А., Егоров С.А. Обзор направлений развития тары и упаковки // Инновационные научные исследования. 2023. №12-2(36). С. 50–57. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10913008>.
2. Груздева И.Г., Андросов В.С. Исследование механических и сорбционных свойств упаковочных картонов // Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Полиграфия: технология, оборудование, материалы». Омск, 2023. С. 14–19.
3. Ешбаева У.Ж., Исмаилова Г.И., Нишинов А.М., Абдуалимова Л.З. Свойства бумаги, содержащей проклеивающее вещество полиакриламида // Universum: технические науки. 2021. №7(88). С. 30–33.
4. Mishurina O.A., Mullina E.R., Chuprova L.V., Ershova O.V., Chernyshova E.P., Permyakov M.B., Krishan A.L. Chemical aspects of hydrophobization technology for secondary cellulose fibers at the obtaining of packaging papers and cardboards // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, no. 24. Pp. 44812–44814.
5. Казанцев О.А., Сивохин А.П., Каморин Д.М. Использование водорастворимых полимеров на основе аминок(мет)акрилатов для повышения качества бумаги для гофрирования // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2014. №2 (338). С. 109–115.
6. Вдовина О.С., Кожевников С.Ю., Ковернинский И.Н. Физико-химические основы поверхностной проклейки бумаги поликатионным покрытием // Химия растительного сырья. 2015. №1. С. 187–192. <https://doi.org/10.14258/jcprm.201501544>.
7. Basyrova S.I., Galikhanov M.F., Shaimukhametova I.F., Bogdanova S.A., Makhotina L.G. Modification of craft paper to change its surface properties // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2313. 060028. <https://doi.org/10.1063/5.0032467>.
8. Мусина Л.Р., Галиханов М.Ф. Практические решения повышения физико-механических и барьерных свойств целлюлозно-бумажного материала с применением полимерного покрытия // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №2. С. 86–90.
9. Басырова С.И., Галиханов М.Ф., Галеева Л.Р. Поверхностные свойства модифицированного картона // ИВУЗ. «Лесной журнал». 2019. №6. С. 233–240. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.233>.
10. Тетерин В. Картон для упаковки замороженных продуктов // Мясные технологии. 2010. №6. С. 32–33.
11. Патент №2693757 С2 (РФ). Упаковочный ламинированный материал, способ получения такового и упаковочный контейнер, изготовленный из упаковочного ламинированного материала / Н. Тофт, Р. Лассон, Й. Балогх. – 14.09.2018.
12. Филатов Н.М., Уваров Б.А., Апанович Н.А. Полиэфирные лаки и эмали для защиты тары: учебное пособие. М., 2015. 232 с.
13. Патент №2684377 С2 (РФ). Способ создания гидрофобного покрытия для поверхности с использованием сверхкритических растворителей / М.А. Тюленева. – 08.04.2019.
14. Рахманов Н.И. Основные особенности переработки ламинированного картона // Молодой ученый. 2024. №23 (522). С. 51–53.
15. Карпова С.В., Черная Н.В., Пенкин А.А., Герман Н.А. Свойства бумаги и картона в зависимости от природы и содержания связующих веществ в нанесенных на их поверхности мелованных покрытиях // Технология органических веществ: материалы 85-ой научно-технической конференции (с международным участием). Минск, 2021. С. 22–26.
16. Хадеева А.А., Галеева Л.Р., Галиханов М.Ф. Выбор биоразлагаемого полимера для создания водозащитного покрытия крафт-картона // Будущее науки – 2024. Сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции. В 5-ти томах. Курск, 2024. Т. 5. С. 184–189.
17. Маликова К.Ю. Сравнительное исследование биоразлагаемых полимерных материалов // Сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. «Пищевые инновации и биотехнологии». Кемерово, 2022. Т. 1. С. 505–506.
18. Крутько Э.Т., Прокопчук Н.Р., Глоба А.И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учебное пособие. Минск, 2014. 105 с.
19. Осовская И.И., Баранова А.Е. Оптимизация условий образования стойкого геля из агар-агара // Химия растительного сырья. 2023. №2. С. 71–78. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211723>.
20. Тихонов С.Л., Тихонова Н.В. Барьерные технологии в производстве мясopодуkтов // Индустрия питания. 2018. Т. 3, №4. С. 52–59. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2018-3-4-6>.

21. Зинина О.В., Вишнякова Е.А., Меренкова С.П., Неверова О.П. Исследование свойств пищевых пленок на основе агара с добавлением функциональных компонентов // Аграрный вестник Урала. 2023. Т. 23, №12. С. 55–64. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-23-12-55-64>.
22. Журавлева И.И., Данилин А.А., Акопян В.А. Высокомолекулярные соединения: учебное пособие. Ч. V: Природные и искусственные полимеры. Самара, 2007. 324 с.
23. Осовская И.И., Васильева А.П., Бородин А.М. Дополнительные главы технологии полимерных материалов Водорастворимые полимеры: учебное пособие. СПб., 2022. 63 с.
24. Баранова А.Е., Осовская И.И. Выделение и свойства агар-агара из красных морских водорослей // Вестник СПГУТД. Серия 1. 2022. №3. С. 100–104. https://doi.org/10.46418/2079-8199_2022_3_17.

Поступила в редакцию 17 марта 2025 г.

После переработки 7 июля 2025 г.

Принята к публикации 6 октября 2025 г.

Galeeva L.R. WATER-PROOF COATING FOR KRAFT-CARDBOARD FROM BIODEGRADABLE POLYMER

Kazan National Research Technological University, st. Karla Marxa, 68, Kazan, 420015, Russia, L.musina@yandex.ru

In this article, a novel packaging material for agricultural products based on kraft-cardboard is proposed, featuring a barrier coating made from biodegradable agar-agar polymer. The optimal concentrations of aqueous agar-agar solutions for application on cardboard were selected. The rheological characteristics of the polymer solution were determined for concentrations of 1%, 2%, and 3%. It was found that with an increase in the concentration of the agar-agar solution, the surface absorbency, measured by the drop method, decreases due to the migration of a larger portion of the polymer macromolecules into the near-surface layers of the cardboard, resulting in reduced porosity of the material. The polymer coating also provides water-resistant functions, reducing the absorbency of kraft-cardboard by approximately 40% upon complete immersion, which is independent of the polymer solution concentration. An increase in the stiffness of the material was observed under bending loads with the increasing density of the agar-agar solution. The achieved results in enhancing the performance properties of kraft-cardboard demonstrated the high effectiveness of using agar-agar as a surface protective coating.

Keywords: kraft-cardboard, biodegradable polymer, agar-agar, viscosity, sorption properties, absorbency, bending.

For citing: Galeeva L.R. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, pp. 371–378. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117007>.

References

1. Panova Ya.A., Yegorov S.A. *Innovatsionnyye nauchnyye issledovaniya*, 2023, no. 12-2(36), pp. 50–57. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10913008>. (in Russ.).
2. Gruzdeva I.G., Androsov V.S. *Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Poligrafiya: tekhnologiya, oborudovaniye, materialy»*. [Proceedings of the XIV International scientific and practical conference "Printing: technology, equipment, materials"]. Omsk, 2023, pp. 14–19. (in Russ.).
3. Yeshbayeva U.Zh., Ismailova G.I., Nishonov A.M., Abdualimova L.Z. *Universum: tekhnicheskoye nauki*, 2021, no. 7(88), pp. 30–33. (in Russ.).
4. Mishurina O.A., Mullina E.R., Chuprova L.V., Ershova O.V., Chernyshova E.P., Permyakov M.B., Krishan A.L. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 24, pp. 44812–44814.
5. Kazantsev O.A., Sivokhin A.P., Kamorin D.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2014, no. 2 (338), pp. 109–115. (in Russ.).
6. Vdovina O.S., Kozhevnikov S.Yu., Koverninskiy I.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2015, no. 1, pp. 187–192. <https://doi.org/10.14258/jcprm.201501544>. (in Russ.).
7. Basyrova S.I., Galikhanov M.F., Shaimukhametova I.F., Bogdanova S.A., Makhotina L.G. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2313, 060028. <https://doi.org/10.1063/5.0032467>.
8. Musina L.R., Galikhanov M.F. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2011, no. 2, pp. 86–90. (in Russ.).
9. Basyrova S.I., Galikhanov M.F., Galeeva L.R. *IVUZ. «Lesnoy zhurnal»*, 2019, no. 6, pp. 233–240. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.233>. (in Russ.).
10. Teterin V. *Myasnyye tekhnologii*, 2010, no. 6, pp. 32–33. (in Russ.).
11. Patent 2693757 C2 (RU). 14.09.2018. (in Russ.).
12. Filatov N.M., Uvarov B.A., Apanovich N.A. *Poliefirnyye laki i emali dlya zashchity tary: uchebnoye posobiye*. [Polyester varnishes and enamels for container protection: a tutorial]. Moscow, 2015, 232 p. (in Russ.).

13. Patent 2684377 C2 (RU). 08.04.2019. (in Russ.).
14. Rakhmanov N.I. *Molodoy uchenyy*, 2024, no. 23 (522), pp. 51–53. (in Russ.).
15. Karpova S.V., Chernaya N.V., Penkin A.A., German N.A. *Tekhnologiya or-ganicheskikh veshchestv: materialy 85-oy nauchno-tehnicheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem)*. [Technology of organic substances: Proceedings of the 85th scientific and technical conference (with international participation)]. Minsk, 2021, pp. 22–26. (in Russ.).
16. Khadeyeva A.A., Galeeva L.R., Galikhanov M.F. *Budushcheye nauki – 2024. Sbornik nauchnykh statey 11-y Mezhdunarodnoy molodezh-noy nauchnoy konferentsii. V 5-ti tomakh*. [The Future of Science - 2024. Collection of scientific articles of the 11th International Youth Scientific Conference. In 5 volumes]. Kursk, 2024, vol. 5, pp. 184–189. (in Russ.).
17. Malikova K.Yu. *Sbornik tezisov X Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. «Pishchevye innovatsii i biotekhnologii»*. [Collection of abstracts of the X International scientific conference of students, graduate students and young scientists. "Food innovations and biotechnology"]. Kemerovo, 2022, vol. 1, pp. 505–506. (in Russ.).
18. Krut'ko E.T., Prokopchuk N.R., Globa A.I. *Tekhnologiya biorazlagayemykh polimernykh materialov: uchebnoye posobiye*. [Technology of biodegradable polymeric materials: a tutorial]. Minsk, 2014, 105 p. (in Russ.).
19. Osovskaya I.I., Baranova A.Ye. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2023, no. 2, pp. 71–78. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211723>. (in Russ.).
20. Tikhonov S.L., Tikhonova N.V. *Industriya pitaniya*, 2018, vol. 3, no. 4, pp. 52–59. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2018-3-4-6>. (in Russ.).
21. Zinina O.V., Vishnyakova Ye.A., Merenkova S.P., Neverova O.P. *Agrarnyy vestnik Urala*, 2023, vol. 23, no. 12, pp. 55–64. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-23-12-55-64>. (in Russ.).
22. Zhuravleva I.I., Danilin A.A., Akopyan V.A. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya: uchebnoye posobiye. Ch. V: Prirodnyye i iskusstvennyye polimery*. [High-molecular compounds: a textbook. Part V: Natural and artificial polymers]. Samara, 2007, 324 p. (in Russ.).
23. Osovskaya I.I., Vasil'yeva A.P., Borodina A.M. *Dopolnitel'nyye glavy tekhnologii polimernykh materialov Vodorastvorimyye polimery: uchebnoye posobiye*. [Additional chapters of polymeric materials technology Water-soluble polymers: a textbook]. St. Petersburg, 2022, 63 p. (in Russ.).
24. Baranova A.Ye., Osovskaya I.I. *Vestnik SPGUTD. Seriya 1*, 2022, no. 3, pp. 100–104. https://doi.org/10.46418/2079-8199_2022_3_17. (in Russ.).

Received March 17, 2025

Revised July 7, 2025

Accepted October 6, 2025

Сведения об авторе

Галеева Ляйсан Рафаиловна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии переработки полимеров и композиционных материалов, L.musina@yandex.ru

Information about author

Galeeva Lyaysan Rafailovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Polymer and Composite Materials Processing Technology, L.musina@yandex.ru