

---

Научная статья

УДК 676.26

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-169-178

## Барьерные и прочностные свойства мешочной бумаги с покрытием из агар-агара

Л.Р. Галеева<sup>1</sup>✉, канд. техн. наук; ResearcherID: [AAE-8448-2019](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9004-4549>

А.А. Хадеева<sup>1</sup>, аспирант; ResearcherID: [NBW-6648-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7756-3770>

С.Н. Якупов<sup>2</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: [R-6951-2016](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-3679>

Е.И. Байгильдеева<sup>1</sup>, канд. техн. наук; ResearcherID: [OLR-1648-2025](#),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4611-4412>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; l.musina@yandex.ru✉, khadeeva1999@mail.ru, baigildeeva\_e\_i@mail.ru

<sup>2</sup>Казанский научный центр РАН, ул. Лобачевского, д. 2/31, г. Казань, Россия, 420111; tamas\_86@mail.ru

---

Поступила в редакцию 07.05.25 / Одобрена после рецензирования 23.08.25 / Принята к печати 25.08.25

**Аннотация.** Получены образцы мешочной бумаги марки М78 с покрытием из агар-агара (биоразлагаемый полимер, производимый из бурых и красных водорослей) толщиной 15–70 мкм. Показано, что при нанесении на мешочную бумагу водного раствора, содержащего агар-агар, происходит формирование сплошного эластичного покрытия, причем часть полимера проникает в объем бумаги, заполняя межволоконное пространство и, возможно, макро- и микропоры самих волокон. При увеличении толщины полимерного покрытия капельная впитываемость материала растет, а затем выходит на некоторое стабильное значение (с учетом ошибки эксперимента). Выяснено, что толщина покрытия из агар-агара 40 мкм достаточна для придания барьерных свойств мешочной бумаге по отношению к действию влаги. При этом капельная впитываемость бумаги с покрытием составляет ~1000 с, а впитываемость при полном погружении – ~40 %. Для оценки механических свойств целлюлозно-бумажных материалов предложен способ определения прочностных свойств полученных образцов, подразумевающий всестороннюю деформацию образцов, позволяющий пренебречь анизотропией. Показано, что тангенциальная жесткость мешочной бумаги с покрытием из агар-агара на 15–20 % выше, чем у исходной бумаги. Разработан механизм данного упрочнения, заключающийся в следующем. При приложении нагрузки на бумажный материал его разрушение происходит за счет как разрыва целлюлозных волокон, так и отделения волокон друг от друга. В случае недостатка связующего нагрузка от волокна к волокну передается только посредством силы трения. В бумаге, поверхностный слой которой пропитан агар-агаром, нагрузка от волокна к волокну идет через полимер, поэтому деформационно-прочностные свойства повышаются. Природа целлюлозных волокон и агар-агара обусловливает проявление хорошей адгезии между ними. Сделан вывод о том, что мешочная бумага с покрытием из агар-агара экологична, т. к. оба ее компонента являются биоразлагаемыми.

**Ключевые слова:** мешочная бумага, агар-агар, капельная впитываемость, водопоглощение, тангенциальная жесткость, биоразлагаемость

**Благодарности:** 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 осуществления трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках госпрограммы «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

**Для цитирования:** Галеева Л.Р., Хадеева А.А., Якупов С.Н., Байгильдеева Е.И. Барьерные и прочностные свойства мешочной бумаги с покрытием из агар-агара // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 169–178. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-169-178>

Original article

## Barrier and Strength Properties of Agar-Agar Coated Sack Paper

*Lyaysan R. Galeeva<sup>1</sup>✉, Candidate of Engineering; ResearcherID: AAE-8448-2019,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9004-4549>*

*Alina A. Khadeeva<sup>1</sup>, Postgraduate Student; ResearcherID: NBW-6648-2025,  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7756-3770>*

*Samat N. Yakupov<sup>2</sup>, Candidate of Engineering; ResearcherID: R-6951-2016,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0047-3679>*

*Ekaterina I. Baygildeeva, Candidate of Engineering;  
ResearcherID: OLR-1648-2025, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9370-7544>*

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University, ul. K. Marks, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; l.musina@yandex.ru✉, khadeeva1999@mail.ru, baigildeeva\_e\_i@mail.ru

<sup>2</sup>Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, ul. Lobachevskogo, 2/31, Kazan, 420111, Russian Federation; tamas\_86@mail.ru

---

Received on May 7, 2025 / Approved after reviewing on August 23, 2025 / Accepted on August 25, 2025

---

**Abstract.** Samples of M78 sack paper coated with agar-agar (a biodegradable polymer produced from brown and red algae) with a thickness of 15–70 µm have been obtained. It has been shown that when an aqueous solution, containing agar-agar is applied to sack paper, a continuous elastic coating is formed, with part of the polymer penetrating into the volume of the paper, filling the interfiber space and, possibly, the macro- and micropores of the fibers themselves. As the thickness of the polymer coating grows, the drip absorbency of the material increases and then reaches a certain stable value (taking into account the experimental error). It has been found that the thickness of the agar-agar coating of 40 µm is sufficient to impart barrier properties to sack paper with respect to the action of moisture. In this case, the drip absorbency of coated paper will be equal to ~1000 s, and the absorbency at full immersion will be ~40 %. To evaluate the mechanical properties of pulp and paper materials, a method is proposed for determining the strength properties of the obtained samples, implying a comprehensive deformation of the samples, allowing for anisotropy to be neglected. It has been shown that the tangential stiffness values of sack paper coated with agar-agar is 15–20 % higher than that of the original paper. A mechanism for this strengthening has been developed, which consists in the following. When a load is applied to the paper material, its destruction occurs due to both the rupture of cellulose fibers and the separation of fibers from each other. In case of a lack of binder, the load is transferred from fiber to fiber only by means of friction force. In paper, the surface layer of which is impregnated with agar-agar, the load

from fiber to fiber goes through the polymer, therefore the deformation and strength properties increase. The nature of cellulose fibers and agar-agar ensures the manifestation of good adhesion between them. It has been concluded that agar-agar coated sack paper is environmentally friendly, since both of its components are biodegradable.

**Keywords:** sack paper, agar-agar, drip absorbency, water absorption, tangential stiffness, biodegradability

**Acknowledgements:** The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of science (postdoctoral students) for the purpose of defending a doctoral dissertation, carrying out research work, as well as performing work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the state program “Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan”.

**For citation:** Galeeva L.R., Khadeeva A.A., Yakupov S.N., Baygildeeva E.I. Barrier and Strength Properties of Agar-Agar Coated Sack Paper. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 169–178. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-169-178>

## *Введение*

Высокие прочностные характеристики мешочной бумаги, наряду с традиционными для целлюлозно-бумажных материалов (ЦБМ) дешевизной, доступностью сырья и удобстве при транспортировке и эксплуатации, делают ее одним из лидеров по объему выпуска и потребления. Но, как и все ЦБМ, мешочная бумага имеет существенный недостаток: снижение механической прочности при увлажнении, что приводит к порче упакованных в нее товаров и продуктов [4].

Для повышения эксплуатационных характеристик ЦБМ применяются разнообразные способы и приемы: пропитка, обработка лаками и составами (мелование), ламинирование, нанесение полимерных покрытий и др. [1, 2, 7–9].

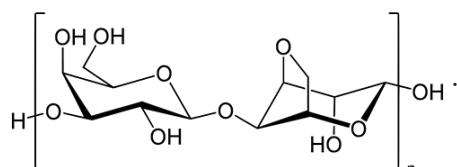
Наиболее удобным и эффективным способом увеличения стойкости бумаги и картона к действию высокой влажности и воды, а также динамических нагрузок является нанесение на их поверхность полимерных покрытий из растворов или суспензий. Однако при использовании синтетических полимеров теряется одно из преимуществ ЦБМ – экологичность и возобновляемость сырья (вторичная переработка). Поэтому проводится все больше исследований по поиску биоразлагаемых полимеров, способных служить надежными покрытиями бумаги и картона, повышающими их эксплуатационные свойства и несильно удорожающими материал. В качестве подобных покрытий пробуют использовать полилактид, крахмал, поликапролактон, альгинат натрия и др. [1, 3, 6, 11–17, 19, 20].

Одним из таких биоразлагаемых полимеров, по нашему мнению, может служить агар-агар, получаемый из бурых и красных водорослей. При нормальных условиях он является отличной защитой бумаги от действия влаги, т. к. растворяется в воде только при температуре выше 90 °C. Добавление такого полимерного покрытия на поверхность ЦБМ позволит повысить ее прочность. В данном случае сохраняется и экологичность: агар-агар допущен к контакту с пищевыми продуктами (является пищевой добавкой Е-406), это биоразлагаемый полимер и бумажная упаковка с таким покрытием перерабатывается вместе с макулатурным сырьем.

Целью данной работы является получение мешочной бумаги с покрытием из агар-агара с определением ее барьерных и прочностных свойств.

### *Объекты и методы исследования*

Объектами исследования были выбраны мешочная бумага марки М-78 (ГОСТ 2228–81) с массой 1 м<sup>2</sup> 78 г и агар-агар 900 (ГОСТ 16280–2002, страна-производитель – Вьетнам) химической формулы



Для исследования приготавливали образцы размерами 120×120 мм. Покрытие, наносимое на поверхность мешочной бумаги, представляло собой водный раствор с агар-агаром в концентрации от 1 до 5 %. Раствор готовили следующим образом. Сначала в небольшое количество воды добавляли агар-агар, кипятили в течение 3–5 мин и доводили до нужной концентрации путем добавления воды с температурой 90–95 °С. Нанесение покрытия на поверхность бумаги осуществляли с помощью кисти. В производственных условиях это возможно с использованием kleильных валиков. Удаление влаги из образцов проводили выпариванием при комнатной температуре в течение не менее 24 ч.

Толщину мешочной бумаги без и с покрытием измеряли микрометром марки ТИП МК25-1 по ГОСТ Р ИСО 534–2012. Определение поверхностной впитываемости капельным способом осуществляли по ГОСТ 12603–67, впитываемости при полном погружении – по ГОСТ 13648.

Прочностные свойства образцов учитывали при помощи специальной экспериментальной установки (рис. 1) с использованием поверхностного давления. В процессе нагружения производили мониторинг формы деформирования образца и фиксировали зависимость «давление  $P$  – прогиб  $H_{sr}$ » ( $H_{sr}$  – средний прогиб), после чего вычисляли тангенциальную жесткость  $B$  для среднего изгиба [18] по классификации Х.М. Муштари [5].

Все измерения проводили не меньше чем 5 раз. Средняя ошибка экспериментов составляла не более 5 %.

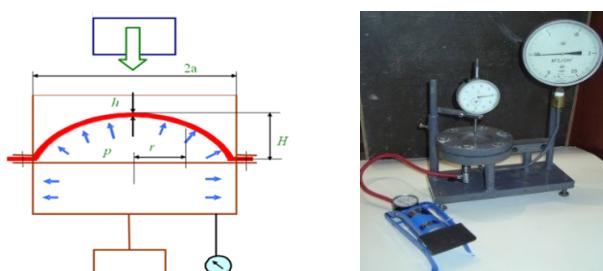


Рис. 1. Схема испытаний и изображение одного из вариантов установки определения тангенциальной жесткости (2а – диаметр (2 радиуса) измерительной ячейки;  $h$  – толщина образца;  $P$  – давление воздуха;  $r$  – радиус отверстия для подачи воздуха;  $H$  – прогиб)

Fig. 1. The test scheme and image of one of the installation options for determining tangential stiffness (2a – diameter (2 radii) of the measuring cell;  $h$  – sample thickness;  $P$  – air pressure;  $r$  – radius of the air supply hole;  $H$  – deflection)

### Результаты исследования и их обсуждение

Первым этапом работы стал поиск оптимальной толщины покрытия из агар-агара. Толщину полимерного покрытия, наносимого на картон, можно изменять, используя водные растворы агар-агара различных концентраций. После нанесения агар-агара в форме 0,5–5,0%-х водных растворов одинакового объема, толщина покрытий ожидалась измениться (рис. 2).

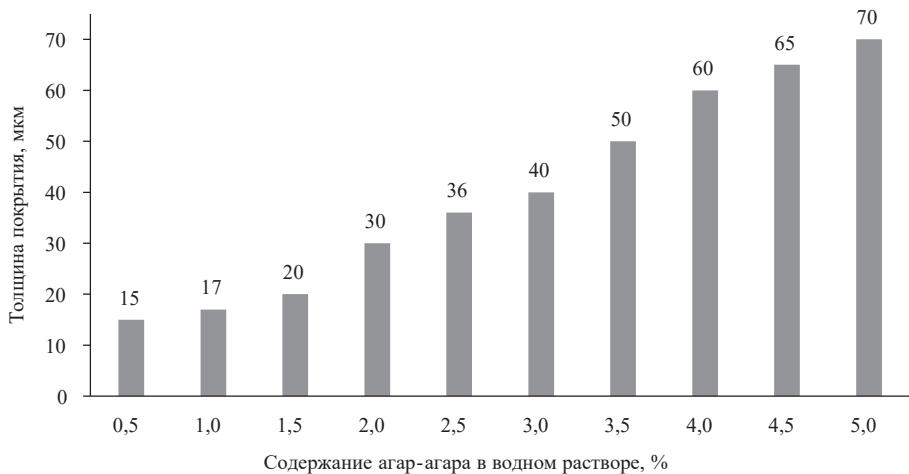


Рис. 2. Толщина покрытия из агар-агара на мешочной бумаге при использовании водных растворов полимера различных концентраций

Fig. 2. The thickness of agar-agar coating on sack paper when using aqueous polymer solutions of various concentrations

Анализ данных рис. 2 показывает, что часть полимера проникает в объем бумаги, заполняя межволоконное пространство и, возможно, макро- и микропоры самих волокон. Об этом свидетельствуют:

отсутствие увеличения толщины покрытия в 2 раза при росте концентрации полимера в растворе во столько же раз (например, при сравнении покрытий 0,5%-х и 1,0%-х или 2,0%-х и 4,0%-х водных растворов агар-агара);

нелинейный характер зависимости толщины покрытия от содержания агар-агара в водном растворе (наблюдается перегиб прямой начиная с использования 1,5%-го раствора полимера).

Одним из самых информативных методов оценки барьерных свойств целлюлозно-бумажных материалов (по отношению к воде) является капельный метод определения впитываемости. Исследование этого показателя позволило установить, что покрытие из агар-агара повышает гидрофобность мешочной бумаги. После нанесения на материал раствора агар-агара на поверхности образуется эластичное покрытие, которое препятствует проникновению воды в структуру бумаги.

Видно (рис. 3), что при использовании растворов агар-агара с концентрацией полимера до 3,0 % капельная впитываемость растет, а затем выходит на некоторое стабильное значение (с учетом ошибки эксперимента). Значит, толщина покрытия из агар-агара 40 мкм достаточна для повышения стойкости мешочной бумаги к действию влаги. К тому же было замечено, что если содержание агар-агара в водном растворе превышало 3 %, то покрытие полу-

чалось неровным, с видимыми следами от кисти. Это происходит из-за высокой вязкости растворов, которая обусловлена высокой степенью полимеризации агар-агара. Поэтому дальнейшие исследования проводили с образцами мешочной бумаги с покрытием, полученным при использовании 3,0%-го водного раствора агар-агара.

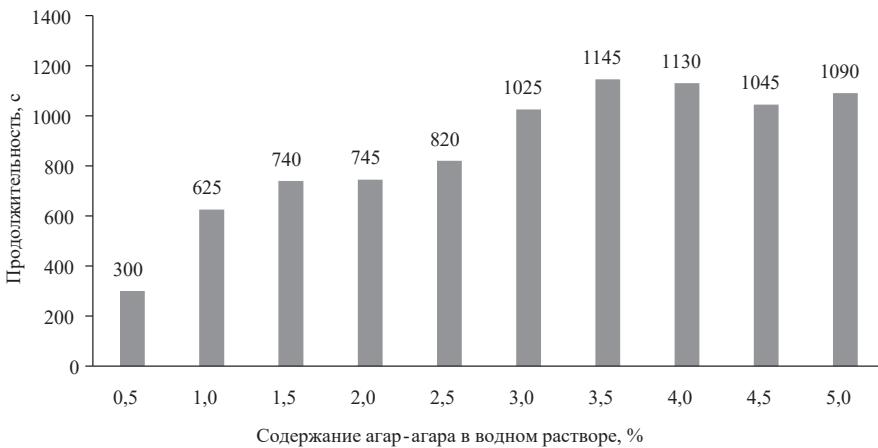


Рис. 3. Впитываемость образцов по капельному методу

Fig. 3. The absorbency of samples by the drip method

Можно заметить, что числовые значения капельной впитываемости достаточно велики, за это время вода может частично испариться, а не впитаться в структуру бумаги, что внесет погрешность в результат. Однако даже в этом случае данные эксперимента говорят о повышенной стойкости мешочной бумаги с покрытием из агар-агара к действию влаги.

Определение впитываемости при полном погружении не выявило существенных отличий для мешочной бумаги (48,0 %) и бумаги с покрытиями из агар-агара различной толщины (47,6–39,4 %), хотя и наблюдалось некоторое снижение значений. Дело в том, что полимерное покрытие выполняет защитную функцию только с одной стороны листа бумаги, хотя при этом барьерные свойства материала безусловно повышаются.

Выше было высказано предположение, что нанесение полимерного покрытия на поверхность ЦБМ позволит повысить ее прочность. Но когда речь идет об анизотропных материалах, говорить о прочности надо с большой долей ограничений – при ее определении нужно внимательно следить за тем, в каком направлении вырезается образец. Как минимум – это машинное или перпендикулярное направление. Но даже небольшое отклонение ориентации приложения нагрузки к образцам ЦБМ при установлении их прочности может дать ошибку. Полимерное покрытие в зависимости от способа его нанесения может как снижать, так и повышать степень анизотропии материалов. Поэтому нами был предложен иной способ определения прочностных свойств полученных образцов, подразумевающий всестороннюю (в 2-мерной плоскости) деформацию образцов. Экспериментально-теоретический метод [10] позволяет устанавливать интегральные механические свойства тонких материалов в 2-мерной постановке. Для этого на экспериментальном этапе из тонкослойного материала со сложной структурой вырезают круглые образцы, которые зажимаются по

контуру на специальных устройствах экспериментальной установки и нагружаются поверхностным давлением.

В процессе нагружения производится мониторинг формы деформирования образцов. На рис. 4 приведены изображения 2 фрагментов испытания – в начале эксперимента и непосредственно в момент разрыва материала.



Рис. 4. Образцы мешочной бумаги с покрытием из агар-агара до нагружения (*а*) и в момент разрушения (*б*)

Fig. 4. The agar-agar coated sack paper samples before loading (*a*) and at the moment of destruction (*b*)

В результате испытаний получена зависимость «давление  $P$  – прогиб  $H_{sr}$ »; некоторые результаты приведены в таблице. Там же указана рассчитанная тангенциальная жесткость испытываемых образцов.

**Зависимость «давление – прогиб» образцов мешочной бумаги  
с покрытием из агар-агара и без него**  
**The “pressure – deflection” relationship for sack paper  
samples with and without agar-agar coating**

Показатель	Значение показателя при $P$ , кгс/см <sup>2</sup>			
	0,022	0,032	0,042	0,052
<i>Мешочная бумага без покрытия</i>				
$H_{sr}$ , мм	1,27	1,91	1,98	2,21
$B$ , Н/м	343,4	176,6	166,8	137,3
<i>Мешочная бумага с покрытием</i>				
$H_{sr}$ , мм	1,56	2,23	2,45	2,76
$B$ , Н/м	422,0	206,0	206,0	176,6

Видно, что тангенциальная жесткость мешочной бумаги с полимерным покрытием в среднем на 15–20 % выше, чем для исходной бумаги. Это ожидаемо, т. к. покрытие играет упрочняющую роль. Механизм данного упрочнения представляется следующим. При приложении нагрузки на бумажный материал его разрушение происходит за счет как разрыва целлюлозных волокон, так и отделения волокон друг от друга. При недостатке связующего нагрузка от волокна к волокну передается только через силу трения. В бумаге, поверхность которой пропитана агар-агаром, нагрузка от волокна к волокну идет сквозь полимер, поэтому деформационно-прочностные свойства повышаются. Для реализации описанного механизма необходима высокая адгезия между волок-

ном и связующим. Природа целлюлозных волокон и агар-агара обуславливает проявление хорошей адгезии между ними как по молекулярной (адсорбционной) теории адгезии (высокое содержание полярных групп в составе обоих компонентов), так и по теории адгезии, основанной на рассмотрении разрушения (развитая поверхность волокон с большим количеством пор).

Встает вопрос об ассимиляции исследуемых материалов микроорганизмами почвы. Выше отмечалось, что бумага, покрытая агар-агаром, намного экологичнее, чем бумага с пластиковым покрытием, т. к. оба компонента биоразлагаемы. Можно предположить, что биоразложение бумаги с покрытием из агар-агара пройдет через этапы гидролиза и ассимиляции, а скорость процесса будет зависеть от условий окружающей среды (температура, влажность, наличие микроорганизмов). Агар-агар как полисахарид сравнительно легко разлагается бактериями и грибами. Микроорганизмы выделяют ферменты (агаразы), которые расщепляют полисахарид на более простые сахара. Разложение целлюлозы также происходит под действием микроорганизмов, выделяющих ферменты (целлюлазы). Затем микроорганизмы поглощают эти сахара и используют их в качестве источника энергии и углерода для роста и размножения. Причем быстрое разложение агар-агара может создать благоприятные условия (влажность, доступность питательных веществ) для разложения бумаги. Агар-агар в этом случае – источник питательных веществ для микроорганизмов, разлагающих целлюлозу. Хотя не исключено, что на начальном этапе покрытие из агар-агара будет частично защищать бумагу от воздействия окружающей среды (например, от высыхания), замедляя ее распад. Однако это предположение нуждается в практическом подтверждении.

### *Выводы*

1. Получена мешочная бумага с покрытием из агар-агара. Показано, что при нанесении на мешочную бумагу водного раствора агар-агара происходит формирование на ней сплошного эластичного покрытия, причем часть агар-агара проникает в объем бумаги, заполняя межволоконное пространство и, возможно, макро- и микропоры волокон.

2. Покрытие из агар-агара повышает гидрофобность мешочной бумаги. Толщина покрытия из агар-агара 40 мкм достаточна для улучшения барьерных свойств мешочной бумаги по отношению к действию влаги. При этом капельная впитываемость бумаги с покрытием составляет ~1000 с, а впитываемость при полном погружении – ~40 %.

3. Тангенциальная жесткость мешочной бумаги с покрытием из агар-агара, определенная при всесторонней деформации образцов, на 15–20 % выше, чем для исходной бумаги. Это происходит за счет передачи нагрузки от волокна к волокну через полимер.

4. Мешочная бумага с покрытием из агар-агара экологична, т. к. оба ее компонента являются биоразлагаемыми.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES**

1. Басырова С.И., Галиханов М.Ф., Галеева Л.Р. Поверхностные свойства модифицированного картона // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 6. С. 233–240.

Basirova S.I., Galikhanov M.F., Galeeva L.R. Surface Properties of Modified Cardboard. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 6, pp. 233–240. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.6.233>

2. Ешбаева У.Ж., Исмаилова Г.И., Нишионов А.М., Абдуалимова Л.З. Свойства бумаги, содержащей проклеивающее вещество полиакриламида // Universum: технические науки: электрон. науч. журн. 2021. № 7(88). Ч. 2. С. 30–33.

Eshbaeva U.Zh., Ismailova G.I., Nishonov A.M., Abdualimova L.Z. Characteristic of the Paper, Containing Waste Poliakrilamid. *Universum: tekhnicheskie nauki: Electronic Scientific Journal*, 2021, no. 7(88), part 2, pp. 30–33. (In Russ.).

3. Захаров И.В., Захарова Н.Л., Канарский А.В., Окулова Е.О., Казаков Я.В., Дулькин Д.А. Физико-механические свойства картона, обработанного биомодифицированным глютеном // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 6. С. 135–144.

Zakharov I.V., Zakharova N.L., Kanarskiy A.V., Okulova E.O., Kazakov Ya.V., Dul'kin D.A. Physical and Mechanical Properties of Cardboard Processed by Biomodified Gluten. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 6, pp. 135–144. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.6.135>

4. Иванов С.Н. Технология бумаги: учебное пособие. 4-е изд. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 696 с.

Ivanov S.N. *Paper Technology*: Textbook. 4th ed. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022. 696 p. (In Russ.).

5. Муштары X.М., Галимов К.З. Нелинейная теория упругих оболочек. Казань: Таткнигоиздат, 1957. 431 с.

Mushtari Kh.M., Galimov K.Z. *Nonlinear Theory of Elastic Shells*. Kazan, Tatknigoizdat Publ., 1957. 431 p. (In Russ.).

6. Назмиева А.И., Галиханов М.Ф., Мусина Л.Р., Нафиков А.Р., Альметова Г.Ф. Влияние пшеничного нативного крахмала и действия коронного разряда на свойства мешочной бумаги // Вестн. Казанс. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 16. С. 151–153.

Nazmievа A.I., Galikhанов M.F., Musina L.R., Nafikova A.R., Almetova G.F. The Influence of Wheat Native Starch and Corona Discharge on the Properties of Sack Paper. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* = Herald of Technological University, 2015, vol. 18, no. 16, pp. 151–153. (In Russ.).

7. Патент RU 2805748 C2. Композиция для создания защитного слоя на поверхности бумаги: № 2021132383: заявл. 08.11.2021: опубл. 23.10.2023. Бюл. № 30 / В.В. Ригин.

Rigin V.V. *Composition for Creating a Protective Layer on the Surface of Paper*. Patent RU 2805748 C2, 2023. (In Russ.).

8. Тимошенко А.Б., Никандров А.Б. Эффективные химикаты для удержания и обезвоживания бумажной массы при производстве картона из макулатурного сырья // Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ЦБП. СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. Т. II. С. 71–76.

Timoshenko A.B., Nikandrov A.B. Effective Chemicals for Retention and Dehydration of the Pulp in the Production of Cardboard from Waste Paper. *Sovremennaya tsellulozno-bumazhnaya promyshlennost'*. Aktual'nye zadachi i perspektivnye resheniya = Modern Pulp and Paper Industry. Current Challenges and Promising Solutions: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Pulp and Paper Specialists. St. Petersburg, Higher School of Technology and Energy of the Saint Petersburg Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers, 2021, vol. II, pp. 71–76. (In Russ.).

9. Филатов Н.М., Уваров Б.А., Апанович Н.А. Полиэфирные лаки и эмали для защиты тары. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 232 с.

Filatov N.M., Uvarov B.A., Apanovich N.A. *Polyester Varnishes and Enamels for Container Protection*. Moscow, Mendeleev University of Chemical Technology, 2015. 232 p. (In Russ.).

10. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Якупов С.Н. Методика исследования неплоских пленок и мембран сложной структуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85, № 2. С. 55–59.

Yakupov N.M., Galimov N.K., Yakupov S.N. Methodology of Studying Non-Planar Films and Membranes of Complex Structure. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* = Industrial Laboratory Diagnostics of Materials, 2019, vol. 85, no. 2, pp. 55–59. (In Russ.). <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-2-55-59>

11. Басырова С.И., Галиханов М.Ф., Шаймукаметова И.Ф., Богданова С.А. The Influence of the Unipolar Corona Discharge on Surface Energy of Modified Cardboard. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2174, iss. 1, art. no. 020203. <https://doi.org/10.1063/1.5134354>

12. Galikhhanov M.F., Galeeva L.R., Nazmieva A.I. Strengthening of Paper Materials under the Action of Unipolar Corona Discharge by Increasing the Level of Interaction between Cellulose Fibers. *Fibre Chemistry*, 2020, vol. 51, pp. 387–391.

<https://doi.org/10.1007/s10692-020-10117-6>

13. Kanie O., Ishikawa H., Ohta S., Kitaoka T., Tanaka H. Study on Characteristics of Paper Laminated with Biodegradable Plastics, 1. Burial Test in Soil. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 2002. vol. 47, no. 1, pp. 89–96. <https://doi.org/10.5109/24463>

14. Kanie O., Tanaka H., Mayumi A., Kitaoka T., Wariishi H. Composite Sheets with Biodegradable Polymers and Paper, the Effect of Paper Strengthening Agents on Strength Enhancement, and an Evaluation of Biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, vol. 96, iss. 3, pp. 861–866. <https://doi.org/10.1002/app.21523>

15. Rastogi V.K., Samyn P. Bio-Based Coatings for Paper Applications. *Coatings*, 2015, vol. 5, no. 4, pp. 887–930. <https://doi.org/10.3390/coatings5040887>

16. Tanpichai S., Srimarut Y., Woraprayote W., Malila Y. Chitosan Coating for the Preparation of Multilayer Coated Paper for Food-Contact Packaging: Wettability, Mechanical Properties, and Overall Migration. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, vol. 213, pp. 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.05.193>

17. Wang Y., Zhang X., Kan L., Shen F., Ling H., Wang X. All-Biomass-Based Eco-Friendly Waterproof Coating for Paper-Based Green Packaging. *Green Chemistry*, 2022, iss. 24, pp. 7039–7048. <https://doi.org/10.1039/D2GC02265F>

18. Yakupov S.N. Influence of Scratches on the Stiffness Properties of Thin-Walled Elements. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 2019, vol. 40, pp. 834–839. <https://doi.org/10.1134/S1995080219060258>

19. Zhang S., Sun P., Lin X., Wang H., Huang X., Liu H., Xu X. Strong, High Barrier, Water- and Oil-Resistant Cellulose Paper-Based Packaging Material Enabled by Polyvinyl Alcohol-Bentonite Coordination Interactions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, vol. 285, art. no. 138076. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138076>

20. Zhu R., He Z., Sun C., Jin S., Ma R., Zhang D., Long Z. Fabrication of Recyclable High-Barrier Water- and Oil-Proof Paper by Sodium Alginate/Cellulose Nanofiber/Ethyl Cellulose/Polyvinyl Butyral. *Industrial Crops and Products*, 2023, vol. 203, art. no. 117084. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117084>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest