

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/9>

УДК 544.777 : 622.367.62



Применение винил- и винилиден-хлоридных латексов при изготовлении асбестового картона

Геннадий И. Мальцев¹✉, maltsewg@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

Юрий Л. Юрьев², charekat@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1187-7401>

¹ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, 620100, Российская Федерация

Необходимость создания недорогого бумагоподобного материала на основе минеральных волокон обусловлена защитой теплоизоляции трубопроводов. Использованные материалы: минеральные волокна – асбест сорта М-4-20; связующее – винил- и винилиден-хлоридные латексы ВХВД-65, ДВХБ-70; коагулянт – сульфат алюминия. Применяемый метод: изготовление в листоотливном аппарате «ТАРПИ» образцов асбестового картона из волокнистой композиции, мас. ч.: 100 асбестовое волокно; 5–60 латекс; 3–10 коагулянт. Для каждого состава волокнистой композиции отливали 10 образцов для испытания. Свойства материала характеризуют физико-механические показатели: разрывная длина (L , м); сопротивление раздиранию (E , мН) и продавливанию (P_0 , кПа); впитываемость при одностороннем смачивании (G , г/м²) и капиллярная (B , мм); степень проклейки (C , с/мм). Результаты: прочность отливок зависит от природы, содержания связующего и коагулянта: для латексов ДВХБ-70/ ВХВД-65 – $L_{max} = (504–662)/(384–417)$ с уровнем значимости $\alpha = 0,05$ в композиции, мас.ч.: 5–20 латекс; 3–6 коагулянт; $L_{min} = 206/(132–168)$ с $\alpha = 0,05$ в композиции, мас.ч.: 25–60 латекс; 7–10 коагулянт; $P_{0(max)} = (14–15)/20$ кПа с $\alpha = 0,05$ при содержании 10/(10–20) мас.ч. латекса. Образцы с ВХВД-65 гидрофильные: $G_{max} / B_{max} = (2–3)/(4–5)$ с $\alpha = 0,05$. При увеличении содержания ДВХБ-70 значения G уменьшаются с 1–3 до нуля с $\alpha = 0,05$; $B \approx 0$ при любом содержании ДВХБ-70. Результаты означают: в теории – физико-механические свойства асбестового картона определяются пленкообразующими свойствами связующих – синтетических латексов; на практике – определены составы волокнистых суспензий для получения защитного материала с высокими потребительскими свойствами. Заключение: ключевым преимуществом для читателей является практическое подтверждение возможности создания новых композиционных материалов с ингредиентами различной природы – минеральной и органической. Нерешенным остается ассортимент латексов с другими мономерами, пригодными для получения асбестового картона.

Ключевые слова: латекс, асбестовый картон, разрывная длина, сопротивление раздиранию, сопротивление продавливанию, впитываемость при одностороннем смачивании и капиллярная, степень проклейки

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мальцев, Г. И. Применение винил- и винилиден-хлоридных латексов при изготовлении асбестового картона / Г. И. Мальцев, Ю. Л. Юрьев // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 151–169. – Библиогр.: с. 163–169 (44 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/9>.

Поступила 01.02.2024. Пересмотрена 19.02.2024. Принята 22.02.2024. Опубликована онлайн 20.03.2024.

Article

The use of vinyl and vinylidene chloride latexes in the manufacture of asbestos cardboard

Gennady I. Maltsev ¹✉, maltsewg@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0750-0070>

Yuri L. Yuryev², charekat@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1187-7401>

¹Ural State University of Forestry and Technologies, Siberian Highway, 37, Ekaterinburg city, 620100, Russian Federation

²Ural State University of Forestry and Technologies, Siberian Highway, 37, Ekaterinburg city, 620100, Russian Federation

Abstract

The need to create an inexpensive paper-like material based on mineral fibers is due to the protection of thermal insulation of pipelines. Materials used: mineral fibers – asbestos grades M-4-20; binder – vinyl- and vinylidene-chloride latexes VKHVD-65, DVKHB-70; coagulant – aluminum sulfate. Method used: production of samples of asbestos cardboard from a fibrous composition in a TAPPI sheet-filling machine, wt. h.: 100 asbestos fiber; 5–60 latex; 3–10 coagulant. For each composition of the fibrous composition, 10 samples were cast for testing. The properties of the material are characterized by physical–mechanical parameters: breaking length (L, m); tear resistance (E, mN) and penetration (P_o, kPa); absorbency during unilateral wetting (G, g/m²) and capillary (B, mm); degree of sizing (C, c/mm). Results: the strength of castings depends on the nature, binder and coagulant content: for latexes DVKHB-70/ VKHVD-65 – $L_{\max} = (504–662)/(384–417)$ with a significance level of $\alpha = 0.05$ in the composition, wt.h.: 5–20 latex; 3–6 coagulant; $L_{\min} = 206/(132–168)$ with $\alpha = 0.05$ in composition, wt.h.: 25–60 latex; 7–10 coagulant; $P_{o(\max)} = (14–15)/20$ kPa with $\alpha = 0.05$ at a content of 10/(10–20) wt.h. latex. Samples with VKHVD-65 are hydrophilic: $G_{\max} / B_{\max} = (2–3)/(4–5)$ with $\alpha = 0.05$. With an increase in the content of DVKHB-70, the values of G decrease from 1–3 to zero with $\alpha = 0.05$; $B \approx 0$ for any content of DVKHB-70. The results mean: in theory, the physical and mechanical properties of asbestos cardboard are determined by the film-forming properties of binders – synthetic latexes; in practice, the compositions of fibrous suspensions for obtaining a protective material with high consumer properties are determined. Conclusion: a key advantage for readers is the practical confirmation of the possibility of creating new composite materials with ingredients of various natures – mineral and organic. The range of latexes with other monomers suitable for the production of asbestos cardboard remains unresolved.

Keywords: latex, asbestos cardboard, breaking length, tearing resistance, punching resistance, absorbency with unilateral wetting and capillary, degree of sizing

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Maltsev G. I., Yuryev Y.L. (2024). The use of vinyl and vinylidene chloride latexes in the manufacture of asbestos cardboard. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 151-169 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/9>.

Received 01.02.2024. *Revised* 19.02.2024. *Accepted* 22.02.2024. *Published online* 20.03.2024.

Введение

Традиционные технологии получения конструкционных изделий на основе органического наполнителя (целлюлоза, бумажная масса, древесная щепа и др.) предусматривают использование связующего, в качестве которого выступают как товарные, так и промежуточные продукты органического синтеза. Например, С.Н. Вьюнков [1] отмечает отверждение карбамидоформальдегидных смол (КФС) с различным мольным соотношением в системе карбамид : формальдегид. Так, при мольном соотношении карбамид : формальдегид 1 : 2 процесс отверждения направлен в сторону образования межмолекулярных связей – метиленовых и метилэфирных, о чем свидетельствует снижение содержания гидроксиметильных групп. Позднее С.Н. Вьюнков и В.В. Васильев [2] применили КФС с низким мольным соотношением формальдегида и карбамида – 1,0 и менее для снижения токсичности древесностружечных плит. Новые смолы содержат много несвязанного карбамида, водный раствор которого имеет слабо щелочной характер и нейтрализует часть отвердителя. Для устранения этих недостатков предлагается использовать добавку формальдегида в виде его водного раствора – формалина. А.А. Федотов и др. [3] в качестве рационального стабилизатора свойств КФС рекомендовали добавку триэтанолamina в количестве 0,2 % от веса КФС. А.А. Леонович и др. [4] вводили в древесное волокно (смесь березы и осины) антипирен на основе гидроксипропилден-дифосфоновой кислоты, массу обрабатывали меламинакарбамидоформальдегидным связующим, формировали ковер и прессовали огнезащитные древесноволокнистые плиты средней плотности.

Т.Н. Вахнина и др. [5] для производства фанеры повышенной водостойкости (марки «ФСФ») использовали фенолоформальдегидный олигомер (ФФС). Исследование процесса желатинизации в присутствии большого количества модифицирующих добавок (более 1,5 %) выявило существенное ухудшение растекаемости связующего, поэтому рекомендуется использовать ускорители отверждения ФФС в количестве, не превышающем 1–1,5 %. А.А. Федотов и др. [6,7] для совершенствования качества водостойкой фанеры ФСФ предлагают снижение

температуры прессования и введение модифицирующих добавок в количестве 0,25–1,5 %, повышающих адгезионную и когезионную прочность фенолоформальдегидного связующего: водные растворы шестиводного хлорида алюминия; безводного хлорида магния; восьмиводного сульфата цинка; сульфосалициловой кислоты; диметилглиоксима. Установлено, что при увеличении доли добавки диметилглиоксима до 1,5 % прочность фанеры при скалывании увеличивается на 25 %, прочность при статическом изгибе – на 30 %, разбухание по толщине – на 10 %. Это позволяет сделать вывод об углублении процесса структурообразования фанеры ФСФ при прессовании на модифицированном связующем.

Н.С. Никулина и др. [8] применили для природной древесины пропиточный состав на основе побочных продуктов производства полибутадиена и метилметакрилата, % мас.: 4-винилциклогексен – 36,4; толуол – 45,6; тяжелый остаток (тримеры бутадиена и другие продукты) – 18. Приготовленные олигомерные растворы после введения сиккатива (4–6 % на олигомер) использовали для изготовления древесно-полимерных композитов. Обработка древесины березы олигомером позволяет улучшить такие свойства древесины, как водопоглощение, разбухание в тангенциальном и радиальном направлениях. А.И. Дмитренко и др. [9,10] разработали и исследовали новые составы для обработки природной древесины на основе отработанного растительного масла с добавками наноразмерного оксида кремния для получения древесного композита с улучшенными свойствами. В состав композиций вводили добавки нанопорошков аморфного и кристаллического оксида кремния в дозировке от 0,01 до 0,5 %. Полученные древесные композиты с добавками наноразмерного оксида кремния имели улучшенные гидрофобные свойства древесины (увеличение краевого угла смачивания на 30 %), повышенную влаго- и водостойкость (в 11 и 14 раз, соответственно), а также уменьшенное разбухание в тангенциальном (в 4 раза) и радиальном (в 5 раз) направлениях. Выбрана оптимальная дозировка нанопорошков оксида кремния (0,01 %). Пропиточные составы на основе

отработанного растительного масла обладают низкой токсичностью, и их использование позволяет утилизировать отходы производства.

А.В. Артёмов и др. [11] получили образцы пластика без связующего (ПБС) на основе древесного наполнителя в различном соотношении модификации лигнина с минеральными веществами путем реализации способа золь-гель технологии. пресовались в герметичной пресс-форме под давлением 40 МПа и при температуре 180 °С с последующим ее уменьшением без снятия давления до 40 °С. Результатами испытаний на минимальные необходимые свойства для отделочных материалов (показатели прочности, водо- и биостойкости, декоративности) установлено рациональное соотношение пресс-композиции с содержанием гидролизованного лигнина в интервале 40–60 %. А.В. Лоренцон и др. [12] показали, что максимальное осаждение сульфатного лигнина (СЛ) наблюдается в интервале рН 4–6 в присутствии 10^{-4} М $Al_2(SO_4)_3$.

Для улучшения характеристик связующего и физико-химических свойств готового изделия проводят модификацию этого компонента исходной массы. А.Б. Дягилева и А.И. Смирнова [13] использовали композиции на основе технических лигнинов и кремниевых минеральных композиций на основе нафтилфталаминовой кислоты (НФК) для получения огнезащитных материалов для обработки деревянных конструкций. Основным механизмом действия композиций заключается в процессе коксообразования на поверхности древесины за счет реакций твердофазного ингибирования целлюлозной матрицы. Происходит модификации лигнина с минеральными веществами путем реализации способа золь-гель технологии. Л.И. Бельчинская и др. [14] обнаружили положительное влияние ультразвукового диспергирования на исследованную систему, заключающееся в повышении степени дисперсности наполнителя пропиточного состава и переходе системы «отработанное моторное масло – 1 % муки хвойных пород древесины» в более гомогенное состояние. Этот факт стимулирует массоперенос частиц композиционного состава в объём древесины, повышая её гидрофобность, что установлено по результатам влагопоглощения образцов древесины берёзы. Наибольшее снижение влагопоглощения (19 %) отмечено

при использовании пропиточного состава, подвергнутого ультразвуковому диспергированию.

В.К. Дубовый и Н.А. Криницин [15] исследовали композиционный материал на основе минерального волокна (стеклянных волокон) с использованием в качестве связующего полиядерных комплексов металлов, в частности титана. Добавление связующего на основе в композицию целесообразно в интервале 5–30 % от массы волокна. В.К. Дубовый и Г.А. Суслов [16] изучали влияние минерального и органического связующего на термостойкость (300 °С) и показатель разрушающего усилия композиционных сорбционных материалов на основе стеклянных волокон. Для достижения требуемых параметров для материала исследовались три типа связующего:

- полиядерные комплексы алюминия, полученные при гидролизе хлорида алюминия;
- полиядерные комплексы алюминия, полученные при гидролизе сульфата алюминия;
- сульфатная небеленая целлюлоза.

Выявлено наиболее подходящее связующее для сорбционного композиционного материала: полиядерные комплексы алюминия, полученные при гидролизе хлорида алюминия, в интервале 20–30 % от массы волокна.

S.K. Bagchi [17], D. Sharma [18], A. Steephen [19] отмечали, что процессы производства целлюлозы и бумаги, волокнистых бумагоподобных материалов связаны с потреблением больших количеств воды (150–500 м³/т) и относятся к числу наиболее экологически опасных, поскольку сопровождаются образованием сложных по составу, загрязненных сточных вод, содержащих трудно окисляемые вещества и токсичные соединения, сброс которых вызывает устойчивое загрязнение природных водоемов.

A. Romani [20], M. Yang [21], L. Axelrod [22] предлагают для уменьшения антропогенного воздействия на окружающую среду предприятий целлюлозно-бумажной промышленности осуществление комплекса природоохранных мероприятий, включающих разработку экологически чистых (малоотходных и безотходных) технологических процессов, применение нового оборудования и видов сырья, обезвреживание и ликвидацию опасных отходов.

N.M. Taylor [23], D. Elovenko [24], S.M. Fitzgerald [25] считают ключевой задачей при создании экологически чистых производств разработку и внедрение нетрадиционных технологических процессов и оборудования. Новые технологии позволяют решать проблемы использования сырьевых и энергетических ресурсов, существенно снижать материалоемкость, энергоемкость и трудоемкость производства за счет использования положений физической и коллоидной химии, трактующих процессы взаимодействия ингредиентов волокнистой суспензии – целлюлозных и асбестовых волокон с дисперсиями синтетических латексов и реагентов на основе канифоли, в частности, с использованием теории устойчивости лиофобных коллоидов Дерягина–Ландау–Фервея–Овербека (ДЛФО).

A. Obmiński [26], Y. Akylbekov [27], C. Avataneo [28] участвуют в разработке экологически безопасных технологий, изготавливают конструктивные материалы, асбестовый картон различного технического назначения (покровные материалы для защиты теплоизоляции трубопроводов и оборудования; биологически стойкая подоснова для линолеума и кровельных материалов; облицовочный ламинат и др.), обладающий высокой негорючестью, устойчивостью в воде и агрессивных средах. Y. Tap [29], R.S. Castoldi [30], A. Vakatovich [31] утилизируют ограниченно используемый низкосортный коротковолокнистый хризотил-асбест, по запасам которого Российская Федерация занимает второе место в мире.

Y. Geng [32] использует в качестве регуляторов агрегативной и сорбционной устойчивости дисперсной фазы проклеивающих агентов (синтетические латексы, реагенты на основе канифоли) – смешанных Al-Fe- и по J. Yi [33] Fe-содержащих коагулянтов, полученных из природных видов сырья (нефелины, бокситы, каолины, алуниты) и промышленных отходов (красные шламы производства глинозема, некондиционные железные руды высокожелезистые бокситы, колчеданные огарки), что по мнению H. Zeng [34], J. Chen [35], H. Karyab [36] является альтернативой дорогим сульфату алюминия и гидроксиду алюминия.

A. Milbrandt [37] считает проклейку результатом сложных коллоидно-химических взаимодей-

ствий волокнистых, гидрофобизирующих, наполняющих и коагулирующих материалов. A. Kuffel [38], M.H. Mazaherifar [39], S. Mahdi [40] подчеркивают влияние на потребительские свойства фабриката условий проклейки: агрегативная и адсорбционная устойчивость дисперсий; поверхностное натяжение; вязкость; температура; pH; жесткость производственной воды; степень гидрофобности поверхности частиц и др. M. Strozzi [41], K. Chen [42] утверждают, что при изготовлении бумаги и картона из органических волокон механическую прочность листа обуславливают межволоконные связи в бумаге, в первую очередь, водородные связи, обеспечивающие три четверти общей прочности межволоконных связей. Наряду с водородными связями известную роль играют и силы Ван-дер-Ваальса, а также силы трения между волокнами.

При использовании асбестовых волокон, которые сами по себе не образуют прочных межволоконных связей, для придания прочности готовым изделиям в качестве связующего обычно используют синтетические латексы. Проклейка асбестового волокна латексом – сложный процесс, зависящий от многих факторов, связанных между собой. J. Zhang [43] уверен, что главное условие высоких показателей асболатексных бумаг и картонов – равномерность осаждения полимера латекса на волокне и высокие адгезионные качества связующего, способствующие образованию прочной связи в системе «волокно–полимер».

Цель исследования – установление влияния концентрации и природы синтетических латексов на физико-механические свойства бумагоподобного материала – асбестового картона.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объекты исследования – компоненты волокнистой суспензии:

– хризотил-асбест сорта М-4-20 (ГОСТ 12871) характеризуется следующими физико-техническими показателями:

а) химический состав приблизительно соответствует формуле $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$;

б) плотность 2,4–2,6 г/см³,

в) температура плавления 1450–1500 °С,

г) термостойкость (потеря конституционной воды и прочности): при длительном постоянном нагреве 500 °С, при кратковременном нагреве 700 °С,

д) щелочестойкость высокая: содержание растворимых веществ в 25% КОН при кипячении в течение 4 ч не более 5%,

е) кислотостойкость слабая: содержание растворимых веществ в НС1 плотностью 1,19 г/см³ при кипячении в течение 4 ч до 57 %,

ж) удельное сопротивление 10⁸ Ом·см,

з) коэффициент преломления 1,5–1,57;

и) содержание конституционной влаги 13,46 %.

По текстуре М-4-20 относится к мягкой группе, вырабатываемой из руд механизированной добычи; 4 – сорт, 20 % – гарантируемый минимальный остаток волокна на основном сите контрольного аппарата.

– латекс ВХВД-65 (ТУ 2241-336-05763458-2002) негорюч, малоопасен, пожаровзрывобезопасен; сополимер винилхлорида с винилиденхлоридом в соотношении 35:65 %; химическая формула: $[-(\text{CH}_2-\text{CHCl})_k-(\text{CH}_2-\text{CCl}_2)_e-]_n$; массовая доля сухих веществ, не менее 4 %; поверхностное натяжение, не более 0,05/0,10 Н/м; массовая доля (остаточный мономер), %: 0,03 винилхлорид; 0,01 винилиденхлорид;

– латекс ДВХБ-70 (ТУ 38-303-04-03-90) водная дисперсия сополимера винилиденхлорида и бутадиена в соотношении 70:30 %; массовая доля сухого вещества, %, не менее 26,0; массовая доля летучих непредельных соединений, %, не более 0,50, в т.ч. массовая доля углеводородов C₂ – C₄, %, не более 0,02. Показатели пленок на основе латекса: условная прочность при растяжении невулканизированной пленки, не менее 1,52 Мпа; прочность склеивания ткани латексом, не менее 0,25 Мпа; массовая доля хлора в каучуке 35,0-37,0 %.

– сульфат алюминия (ГОСТ 12966).

Предмет исследований – физико-механические показатели опытных образцов асбестового картона:

– разрывная длина L , м (ГОСТ ИСО 1924-1);

– сопротивление раздиранию E , мН (ГОСТ 13525.3);

– сопротивление продавливанию P_0 , кПа (ГОСТ Р ИСО 2758);

– впитываемость при одностороннем смачивании G , г/м² (ГОСТ 12605);

– капиллярная впитываемость B , мм (ГОСТ 12602);

– степень проклейки C , с/мм (ГОСТ 8049):

Дизайн эксперимента

В качестве связующих рассмотрена возможность применения латексов: ВХВД-65 – сополимер винилхлорида и винилиденхлорида (CH₂ = CCl₂), пластифицированный диоктилфталатом; ДВХБ-70 – сополимер винилиденхлорида с бутадиеном, в котором бутадиен служит «внутренним» пластификатором. Латексы на основе поливинилхлорида содержат частицы 50–500/1000 нм, эмульгированные мылами высших жирных кислот, солями парафиновых моносulfоокислот (до 20 атомов углерода) и др.; обладают химической, бензо- и маслостойкостью, низкой горючестью и газопроницаемостью, склонны к отщеплению хлороводорода. Поливинилхлорид – типичный пластик, его пластифицируют введением низкотемпературного диоктилфталата или смешивают с эластомерным бутадиен-нитрильным латексом. Исследованными латексами проклеивали асбестовые волокна сорта М-4-20; в качестве коагулянта использовали сульфат алюминия.

Изготовление опытных образцов и определение физико-механических показателей асбестового картона выполнены по традиционной методике, описанной В.К. Дубовным и др. [44].

Лабораторные образцы асбестового картона листовой формы с массой ~80 г/м² изготавливали из хризотил-асбеста с добавками связующего и коагулянта в заданных соотношениях.

Роспуск минерального волокна массой 100 г производили в 1,0 дм³ воды на мешалке при скорости 300 об/мин в течение 5 мин. В полученную суспензию при перемешивании добавляли 5–60 г латекса, выдерживали систему в течение 2–3 мин для равномерного распределения всех компонентов в объеме. Проклейку минеральных волокон латексом осуществляли введением в суспензию раствора коагулянта – сульфата алюминия, в количестве 3–10 г в пересчете на Al₂(SO₄)₃. После окончания проклейки через 10 мин волокнистую суспензию

разбавляли до 3 дм³ и помещали в формующую колбу лабораторного листоотливного аппарата «ТАРРИ». Полученные образцы материала сушили до постоянной массы (г/м²), затем кондиционировали (по ГОСТ 13523) и определяли их толщину (по ГОСТ 27015) для расчета показателей механической прочности. Для каждого состава волокнистой массы готовили 10 образцов для последующих испытаний.

Анализ данных

Использован метод первичной статистической обработки экспериментальных данных, которые позволяют получать непосредственные первичные статистические показатели, отражающие результаты испытаний, проведенных в ходе эксперимента.

Показателями первичных методов обработки опытных данных являются точечные оценки:

– выборочное среднее (среднее арифметическое), как средняя оценка изучаемого качества:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

где n – число опытов; x_i – значение параметра в опыте;

– разброс (размах), равный разности между максимальным и минимальным значениями в выборке:

$$\Delta x = x_{max} - x_{min} \quad (2)$$

– дисперсия, равная среднему арифметическому квадратов отклонений значений переменной от их среднего значения, что позволяет оценить степень вариации данных в выборке:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

где σ^2 – выборочная дисперсия; s^2 – исправленная дисперсия

Более информативными являются интервальные оценки, которые с определенной степенью точности оценивают испытываемый параметр генеральной совокупности. Интервальная оценка задается двумя границами интервала, в котором находится оцениваемая характеристика. Используют доверительные интервалы, которые соответствуют заранее заданной доверительной вероятности и в которых находится неизвестный параметр генеральной совокупности. Интервальной оценке соответствует доверительная вероятность или надежность, с которой

этот интервал покрывает неизвестный параметр генеральной совокупности. На практике, наряду с доверительной вероятностью (p), используют уровень значимости: $\alpha = (1 - p)$.

Интервальной оценкой параметра G служит доверительный интервал с границами l_1 и l_2 , которые являются функциями выборочных значений $x_1, x_2 \dots x_n$ и который с заданной доверительной вероятностью $p = 0,90-0,99$ накрывает оцениваемый параметр G :

$$P\{l_1 < G \leq l_2\} = P \quad (5)$$

Статистическая обработка результатов испытаний опытных отливок асбестового картона, выполненная с использованием программного пакета «Statistica», показала, что исследованные физико-механические характеристики определены с доверительной вероятностью $p = 0,95$ и уровнем значимости $\alpha = 0,05$.

Результаты

Максимальные значения разрывной длины (L) образцов выявлены при невысоком содержании латексов и коагулянта, мас.ч.: 5,0/20,0 ДВХБ-70/ВХВД-65; 3–6 Al₂(SO₄)₃, а именно ДВХБ-70/ВХВД-65, м: $L_{max} = (504-662)/(384-417)$. При четырехкратном превышении содержания латекса ВХВД-65 по отношению к ДВХБ-70 и двухкратном – сульфата алюминия, тем не менее, разрывная длина на 24–38 % ниже для материала со связующим ВХВД-65. При увеличении количества ДВХБ-70/ВХВД-65 в исходной композиции до (20–40)/(40–60) мас.ч. и сульфата алюминия до 10 мас.ч., значения разрывной длины снижаются до минимальных значений: $L_{min} = 206/(132-168)$ (рис. 1а, 2а), вследствие изменения режима осаждения связующего на минеральных волокнах – вместо равномерного распределения латексов между волокнами хризотил-асбеста наблюдается интенсивное комкование волокнистой массы, нарушение внутренней структуры материала, во многом обеспечивающей его прочностные свойства.

В отличие от монотонно убывающих значений разрывной длины асбокартона при увеличении содержания ДВХБ-70, для сопротивления раздираанию (E) выявлена экстремальная зависимость от содержания связующего, характерная для обоих латексов, а именно, при 20 мас.ч. ДВХБ-70/ВХВД-65 $E_{max} = (1840-1856)/(3200-3392)$ мН.

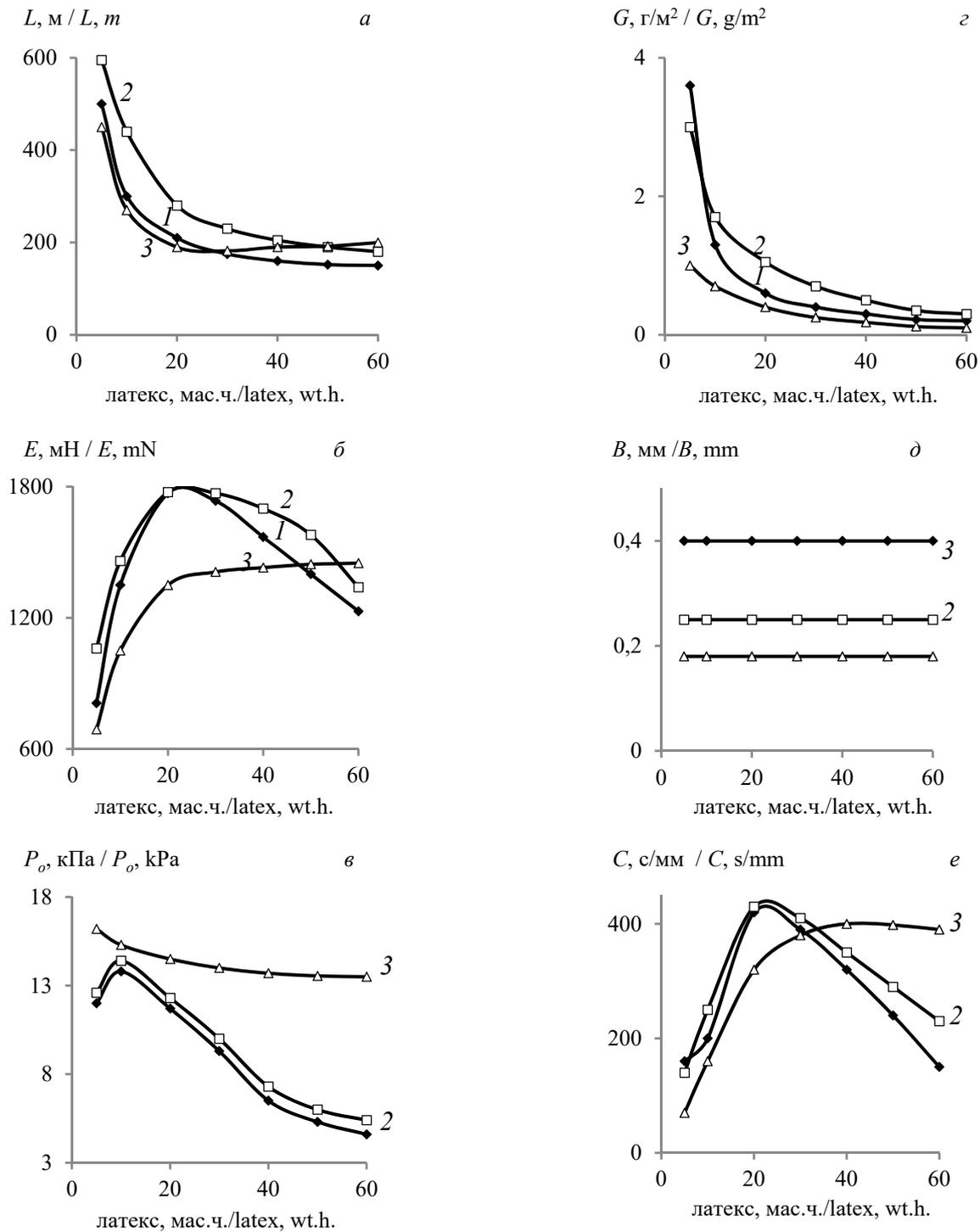


Рисунок 1. Зависимость физико-механических показателей картона от содержания латекса ДВХБ-70 и сульфата алюминия, мас.ч.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)
 Figure 1. Dependence of physical and mechanical parameters of cardboard on the content latex DVHB-70 and aluminum sulfate, wt.h.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

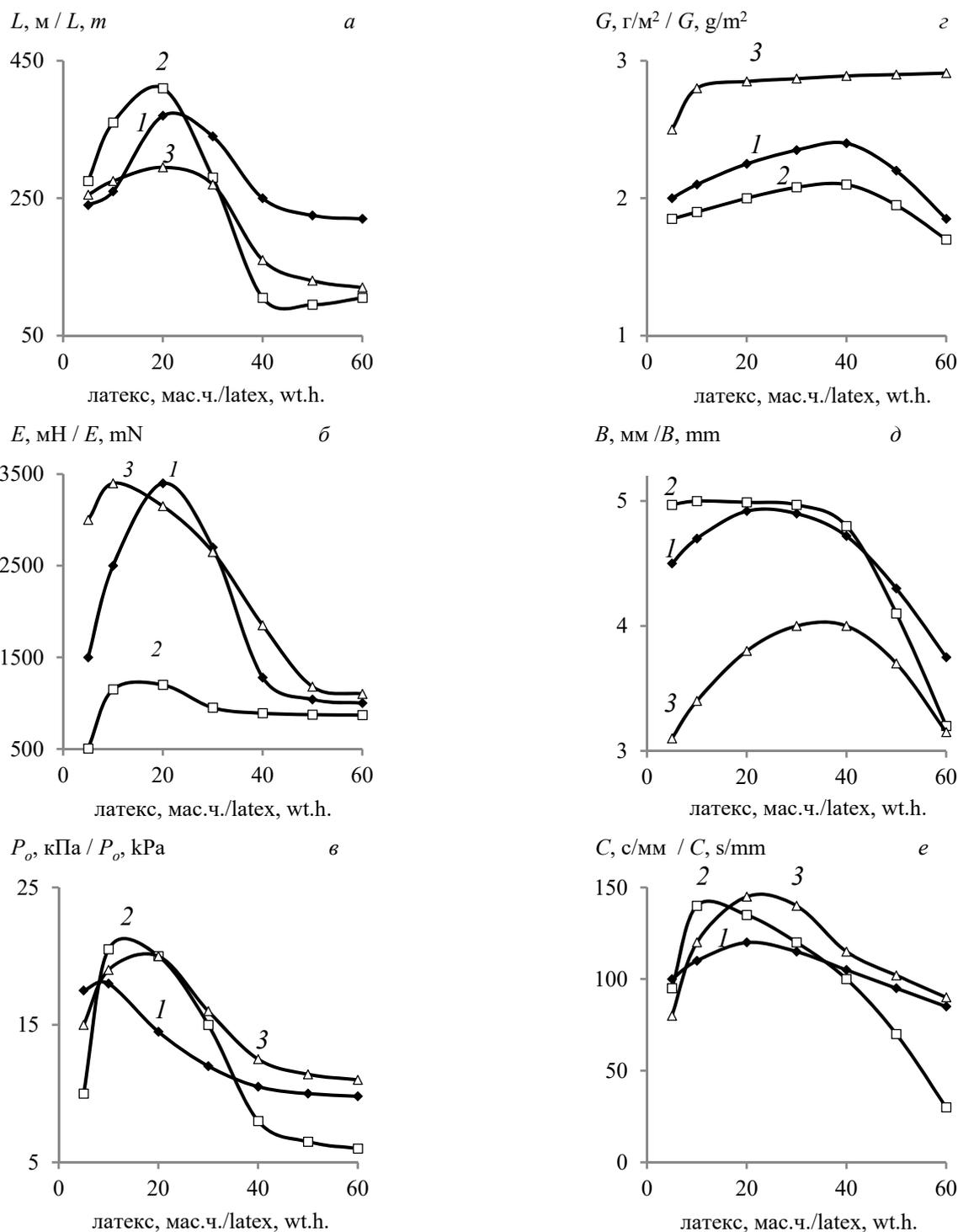


Рисунок 2. Зависимость физико-механических показателей картона от содержания латекса ВХВД-65 и сульфата алюминия, мас.ч.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)
 Figure 2. Dependence of physical and mechanical parameters of cardboard on the content of latex VHVD-65 and aluminum sulfate, wt.h.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3).

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

Значения E_{\max} , характеризующие, в основном, эластичные свойства материала, для образцов с ВХВД-65 на 35–38 % выше, чем для асбокартона с ДВХБ-70 (рис. 1б, 2б).

Максимальные значения сопротивления продавливанию P_o при содержании 10/(10–20) мас.ч. ДВХБ-70/ВХВД-65 равняются $P_{o(\max)} = (14–15)/20$ кПа. Как и с предыдущим показателем (E), сопротивление продавливанию выше на 25–30 % для изделий с ВХВД-65, по сравнению с ДВХБ-70. При высоком содержании коагулянта (10 мас.ч.) латекс ДВХБ-70 количественно осаждается на минеральных волокнах, демонстрируя высокие показатели $P_o = 13–14$ кПа (рис. 1в, 2в).

Для образцов с ВХВД-65 обнаружена высокая влагоемкость асбокартона согласно впитываемости при одностороннем смачивании (G) и капиллярной впитываемости (B): $G_{\max}, \text{г/м}^2 / B_{\max}, \text{мм} = (2–3)/(4–5)$ (рис. 2 з, д). Для отливок с ДВХБ-70 значения G уменьшаются с 1–3 г/м² до, практически, нуля при увеличении содержания связующего в исходной массе. Очевидно, что решающую роль в придании высокой гидрофобности материалу придают пленкообразующие свойства латекса ДВХБ-70.

Значения капиллярной впитываемости (B) близки к нулю при любых концентрациях ДВХБ-70 (рис. 1 з, д). Высокая влагоемкость асбокартона с ВХВД-65 обусловлена присутствием в составе сополимера значительного количества атомов хлора (67–68 %), подверженных значительной гидратации.

Высокие пленкообразующие свойства ДВХБ-70 определяются природой эмульгатора (олеат аммония), образующего в присутствии коагулянта малорастворимый олеат алюминия, при нейтральной коагуляции связующего в режиме относительно равномерного осаждения на поверхности асбестовых волокон.

Подтверждением являются более высокие значения степени проклейки для образцов с ДВХБ-70 ($C = 425–435$ с/мм), по сравнению с ВХВД-65 ($C = 143–161$ с/мм) при содержании в волокнистой суспензии связующих 20 мас.ч. Зависимости величин степени проклейки от содержания связующих ДВХБ-70/ и ВХВД-65 имеют экстремальный характер с наличием максимума при относительно невы-

соком количестве латексов (20–25 мас.ч.) и коагулянта (3–6 мас.ч.) в волокнистой массе. Очевидно, решающим фактором остается комфортный режим осаждения латексов на минеральные волокна в процессе проклейки.

Для визуализации опытных данных построена гистограмма (рис. 3), показывающая частоту появления измеренных значений разрывной длины (L , м) образцов асбестового картона, полученных при отливке волокнистой суспензии состава, мас.ч.:100 хризотил-асбест марки М-4-20; 20,0 латекс ДВХБ-70; 6,0 сульфат алюминия. Высота каждого столбца указывает на частоту появления значений параметра в выбранном диапазоне, а количество столбцов – на число выбранных диапазонов. Гистограмма позволяет наглядно представить тенденции изменения измеряемых параметров и зрительно оценить закон их распределения, быстро определить центр, разброс и форму распределения случайной величины. На оси абсцисс гистограммы отмечаются интервалы, а на оси ординат – частота попаданий результатов измерений в каждый интервал.

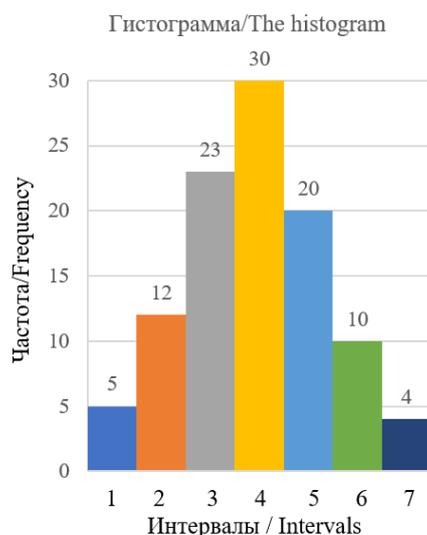


Рисунок 3. Частота появления измеренных значений разрывной длины (L , м) образцов асбестового картона, полученных при отливке волокнистой суспензии

Figure 3. The frequency of occurrence of measured values of the breaking length (L , m) of asbestos cardboard samples obtained by casting a fibrous suspension

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Установлены следующие границы семи интервалов: 1 – 269–271; 2 – 272–274; 3 – 275–277; 4 – 278–282; 5 – 283–285; 6 – 286–288; 7 – 289–291.

Представленная гистограмма имеет форму нормального распределения по результатам 104 выполненных измерений, что говорит о стабильности процесса. Таким образом, разрывная длина асбестового картона исследованной системы равняется $L = 280$ м (см. рис. 1а, кривая 2).

Обсуждение

Поскольку в научной периодике за последние 5 лет не обнаружено работ, непосредственно связанных с получением и изучением свойств асбестового картона, выявленные результаты можно опосредовано сопоставить с данными В.К. Дубовый и др. [15,16,44], которые исследуют материалы, изготовленные на основе стекловолокна и предназначенные для фильтрации воздуха. Стекланные волокна имеют целый комплекс уникальных свойств: термо-, хемо- и биостойкость, высокие удельную поверхность, фильтрующую способность и прочность, устойчивость к действию агрессивных сред. В отличие от волокон растительного происхождения стекланные волокна не способны к фибриллированию, набуханию и связеобразованию, вследствие чего также, как и асбестовые волокна, нуждаются в применении связующего в исходной композиции при изготовлении фильтровального материала. Использование неорганических связующих обеспечивает устойчивость фильтровальных материалов при высоких температурах (до 700 °С). Органические связующие в зависимости от химического состава дают возможность фильтровать воздушные среды при нормальных температурах. В качестве органических связующих были выбраны поливинилацетатная дисперсия и мелкодиспергированный водный раствор полиэтилена, обладающие хорошей адгезией к стекланным волокнам. Водные дисперсии этих компонентов позволяют применять их по бумажной технологии. Также в качестве органического связующего используют волокна растительного сырья, в качестве которого взята термомеханическая масса (ТММ), неорганического связующего – сульфат алюминия. Полиядерные комплексы алюминия обладают высокой связеобразующей способностью по

отношению к стекланным волокнам и достаточно хорошими сорбционными характеристиками.

При использовании в качестве связующего дисперсии поливинилацетата (ПВА) прочность достигает максимальных значений при расходе 10 % ПВА: 460–730 кПа. Для максимальных значений прочности при расходе связующего 10 % была исследована капиллярная впитываемость образцов стекловолоконистой бумаги $B = 84–135$ мм. Отсюда, стекловолокно в составе готового материала придает последнему существенную прочность по сравнению с асбестовыми волокнами, но резко снижает водоотталкивающие свойства, исключая возможность использования его на открытом воздухе.

К трудностям, возникшим на протяжении работы, следует отнести проклейку композиций исходного материала с высоким содержанием связующего и коагулянта, а именно, значительное комкование волоконистой массы при добавлении сульфата алюминия, что затрудняет получение отливок с одинаковой толщиной по всей площади образца.

Оценивая полученные результаты, можно констатировать, что физико-механические показатели асбестового картона определяются не только природой и количеством связующего, но и благоприятным режимом проклейки, обеспечивающем равномерное распределение исходных компонентов по всему объему получаемой отливки, что было также отмечено и при изготовлении фильтрующего материала на основе стекловолокна.

Для изучения данной темы в дальнейших исследованиях необходимо рекомендовать поиск альтернативных коагулянтов, которые могли бы обеспечить не только количественную коагуляцию латексов на асбестовых волокнах, но и «спокойный» кинетический режим осаждения связующего для получения однородного готового материала.

Практическое и теоретическое использование результатов эксперимента заключается в наработке навыков получения асбестового картона с воспроизводимыми физико-механическими показателями на основе теоретических представлений коллоидной химии: гидрофильно-олеофильного взаимодействия органических латексных частиц с минеральными волокнами хризотил-асбеста в условиях максимальной

агрегативной устойчивости и гетерокоагуляции связующего при получении однородной волокнистой суспензии и проклейки волокон, соответственно.

Слабым моментом разрабатываемой технологии является возможная неоднородность минерального сырья – хризотил-асбеста, добываемого карьерным способом.

Ограничения, с которыми столкнулись в ходе работы, относятся к оптимизации удельного расхода реагентов исходной композиции, определяющего себестоимость получения готового материала и требуемые физико-механические показатели асбестового картона.

План будущих исследований включает опробование других типов латексов (в частности, промышленных синтетических) и коагулянтов с целью получения асбестового картона с требуемыми потребительскими свойствами.

Ученым, проводящим исследования в данной области, рекомендуется расширять ассортимент изготавливаемых бумагоподобных материалов на основе минеральных волокон хризотил-асбеста.

Заключение

Бумагоподобные материалы с применением синтетических латексов характеризуются рядом преимуществ: высокими технологическими и эксплуатационными свойствами, относительно невысокой стоимостью и доступностью, безопасностью для здоровья работающих и окружающей среды, легкой смываемостью и возможностью регулирования показателей в широком их диапазоне. Обычно использование латексов в составе наполненных композиций ограничивает их низкая устойчивость при совмещении с минеральными наполнителями, поэтому используются специально разработанные латексы, преимущественно сополимеры бутадиена со стиролом, которые получают в две стадии с дополнительным концентрированием.

Максимальные прочностные свойства образцов асбокартона на основе сорта М-4-20 выявлены при невысоком содержании латексов и коагулянта, мас.ч.: 5,0 ДВХБ-70; 20,0 ВХВД-65; 3–6 $Al_2(SO_4)_3$, а именно ДВХБ-70/ВХВД-65, м: $L_{max} = (504–662)/(384–417)$. При увеличении количества ДВХБ-70/ВХВД-65 до (20–40)/(40–60) мас.ч. и сульфата алюминия до 10 мас.ч. значения разрывной длины

образцов снижаются: $L_{min} = 206/(132–168)$, что связано с изменением режима осаждения связующего. Статистическая обработка результатов испытаний отливок асбестового картона, выполненная с использованием программного пакета «Statistica», показала, что исследованные характеристики материала определены с доверительной вероятностью $p = 0,95$ и уровнем значимости $\alpha = 0,05$.

Для образцов с ВХВД-65 обнаружена высокая влагоемкость асбокартона. Для отливок с ДВХБ-70 значения впитываемости при одностороннем смачивании (G) уменьшаются с 1–3 г/м² до, практически, нуля при увеличении содержания связующего в исходной массе. Значения капиллярной впитываемости (B) близки к нулю при любых исследованных концентрациях ДВХБ-70. Указанное свойство обусловлено высокой пленкообразующей способностью латекса, благодаря природе эмульгатора (олеат аммония), образующего в присутствии коагулянта малорастворимый олеат алюминия при нейтрализационной коагуляции связующего с относительно равномерным осаждением последнего на поверхности асбестовых волокон.

Таким образом, по совокупности прочностных и гидрофобных свойств для получения бумагоподобного материала на основе минеральных волокон хризотил-асбеста (100 мас.ч.) рекомендуется латекс ДВХБ-70 (10–20 мас.ч.) и коагулянт $Al_2(SO_4)_3$ (3–6 мас.ч.).

Список литературы

1. Вьюнков С. Н. Влияние карбамида на отверждение карбамидоформальдегидных смол. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019; 226: 155–161. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.155-161. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37233749>.
2. Вьюнков С. Н., Васильев В. В. Модификация отвердителя карбамидоформальдегидных смол с низким мольным соотношением формальдегида к карбамиду. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 243: 284–296. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.284-296. Режим доступа <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53976464>.
3. Федотов А. А., Вахнина Т. Н., Титунин А. А., Свиридов А. В. Исследование влияния стабилизаторов на свойства карбамидоформальдегидного связующего и фанеры ФК. Лесотехнический журнал. 2020; 10 (1): 136–144. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42853667>.
4. Леонович А. А., Свиридов Е. А., Глазунова М. Г. Поисковые исследования в создании моноструктурных древесноволокнистых плит пониженной горючести. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020; 232: 233–243. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.233-243. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44256696>.
5. Вахнина Т. Н., Федотов А. А., Титунин А. А., Сусоева И. В. Влияние модификаторов на время отверждения фенолоформальдегидного связующего для прессования фанеры при низкотемпературном режиме. Лесотехнический журнал. 2019; 9(4) (36): 99–108. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/11. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41748527>.
6. Федотов А. А., Вахнина Т. Н., Котиков С. А. Повышение прочностных показателей фанеры ФСФ путем использования модифицирующих добавок к связующему. Лесотехнический журнал. 2020; 10(1) (37): 124–135. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/13. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42853666>.
7. Федотов А. А., Вахнина Т. Н., Котиков С. А. Влияние факторов процесса производства на показатели фанеры на модифицированном фенолоформальдегидном связующем. Лесотехнический журнал. 2021; 11(1) (41): 88–100. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/8. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44938468>.
8. Никулина Н. С., Дмитренко А. И., Томина Е. В., Никулин С. С., Жужукин К. В. Разработка модифицирующих составов древесины на основе побочных продуктов производства полибутадиена и метилметакрилата. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245: 318–330. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.318-330. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768963>.
9. Дмитренко А. И., Никулин С. С., Никулина Н. С., Боровской А. М., Недзельская Е. А. Исследование процесса пропитки древесины березы отработанным растительным маслом. Лесотехнический журнал. 2020; 10 (2) (38): 161–168. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/16. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43171823>.
10. Томина Е. В., Дмитренко А. И., Жужукин К. В., Ходосова Н. А., Мозговой Н. В. Повышение водостойкости древесины пропиточным составом на основе растительного масла с диоксидом кремния. Лесотехнический журнал. 2022; 12(2) (46): 68–79. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/6>. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49049979>.
11. Артёмов А. В., Вураско А. В., Ершова А. С., Бурындин В. Г. Влияние содержания гидролизного лигнина на показатели отделочного материала на основе пластика без связующего. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023; 245: 293–307. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.293-307. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768961>.
12. Лоренцсон А. В., Геворкянц Т. Д., Морева Ю. Л., Чернобережский Ю. М. Температурная зависимость коагуляционного действия $Al_2(SO_4)_3$ на водную дисперсию сульфатного лигнина. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023.; 245: 308–317. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.308-317. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768962>.

13. Дягилева А. Б., Смирнова А. И. Сравнительное исследование термостабильности древесины, обработанной золь-гель композицией на основе лигнина. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022; 239: 236–247. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.236-247. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49178598>.
14. Бельчинская Л. И., Жужукин К. В., Новикова Л. А. Влияние ультразвукового диспергирования пропиточного состава древесины на её гидрофобизацию. Лесотехнический журнал. 2019; 9(2) (34): 126–136. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38472864>.
15. Дубовый В. К., Криницин Н. А. Влияние содержания и вида связующего на прочность бумаги из стеклянных волокон. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020; 232: 244–251. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.244-251. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44256697>.
16. Дубовый В. К., Суслов Г. А. Исследование прочности сорбционных композиционных материалов на основе микротонких стеклянных волокон. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020; 233: 221–227. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.221-227. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44489959>.
17. Bagchi S.K., Patnaik R., Rawat I. Beneficiation of paper-pulp industrial wastewater for improved outdoor biomass cultivation and biodiesel production using *Tetradesmus obliquus* (Turpin) Kützing. Renewable Energy. 2024; 222. 119848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119848>.
18. Sharma D., Sahu S., Singh G. An eco-friendly process for xylose production from waste of pulp and paper industry with xylanase catalyst. Sustainable Chemistry for the Environment. 2023; 3. 100024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100024>.
19. Steephen A., Preethi V., Annenewmy B. Solar photocatalytic hydrogen production from pulp and paper wastewater. International Journal of Hydrogen Energy. 2024; 52(A):1393–1404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.381>.
20. Romani A., Del-Rio P.G., Rubira A. Co-valorization of discarded wood pinchips and sludge from the pulp and paper industry for production of advanced biofuels. Industrial Crops and Products. 2024; 209. 117992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117992>.
21. Yang M., Li J., Wang S. Status and trends of enzyme cocktails for efficient and ecological production in the pulp and paper industry. Journal of Cleaner Production. 2023; 418. 138196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138196>.
22. Axelrod L., Charron P., Tahir I. The effect of pulp production times on the characteristics and properties of hemp-based paper. Materials Today Communications. 2023; 34. 104976. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104976>.
23. Taylor N.M., Pilkington G.A., Snow T., Dowding P.J. Surface forces and friction between Langmuir-Blodgett polymer layers in a nonpolar solvent. Journal of Colloid and Interface Science. 2024; 653(B):1432–1443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.146>.
24. Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels. Materials Today: Proceedings. 2019; 19(5): 2389–2395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.041>.
25. Fitzgerald S.M. Resolving asbestos and ultrafine particulate definitions with carcinogenicity. Lung Cancer. 2024; 189. 107478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2024.107478>.
26. Obmiński A. Asbestos in building and its destruction. Construction and Building Materials. 2020; 249. 118685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118685>.
27. Akyzbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023; 8. 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100488>.

28. Avataneo C., Petriglieri J.R., Capella S. Chrysotile asbestos migration in air from contaminated water: An experimental simulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2022; 424(C). 127528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127528>.
29. Tan Y., Zou Z., Qu J. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 283. 124637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124637>.
30. Castoldi R.S., Liebscher M., Souza L.M.S. Effect of polymeric fiber coating on the mechanical performance, water absorption, and interfacial bond with cement-based matrices. *Construction and Building Materials*. 2023; 404. 133222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133222>.
31. Bakatovich A., Gaspar F., Boltrushevich N. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Construction and Building Materials*. 2022; 352. 129055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129055>.
32. Geng Y., Nie Y., Du H. Coagulation performance and floc characteristics of Fe–Ti–V ternary inorganic coagulant for organic wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 2023; 56. 104344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104344>.
33. Yi J., Chen Z., Xu D. Preparation of a coagulant of polysilicate aluminum ferric from foundry dust and its coagulation performance in treatment of swine wastewater. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 434. 140400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140400>.
34. Zeng H., Tang H., Sun W. Deep dewatering of bauxite residue via the synergy of surfactant, coagulant, and flocculant: Effect of surfactants on dewatering and settling properties. *Separation and Purification Technology*. 2022. 302. 122110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122110>.
35. Chen J., Li X., Cai W. High-efficiency extraction of aluminum from low-grade kaolin via a novel low-temperature activation method for the preparation of poly-aluminum-ferric-sulfate coagulant. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 257. 120399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120399>.
36. Karyab H., Ghasemi M., Ghotbinia F. Efficiency of chitosan nanoparticle with polyaluminum chloride in dye removal from aqueous solutions: Optimization through response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 249. 125977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125977>.
37. Milbrandt A., Zuboy J., Coney K. Paper and cardboard waste in the United States: Geographic, market, and energy assessment. *Waste Management Bulletin*. 2024; 2(1): 21–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.12.002>.
38. Kuffel A., Daeid N.N., Gray A. Comparison of swabbing and cutting-out DNA collection methods from cotton, paper, and cardboard surfaces. *Forensic Science International: Synergy*. 2024; 8. 100453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2023.100453>.
39. Mazaherifar M.H., Coşoreanu C., Timar C.M. Physical and mechanical properties of foam-type panels manufactured from recycled cardboard. *Construction and Building Materials*. 2024; 411. 134685 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134685>.
40. Mahdi S., Xie T., Venkatesan S., Gravina R.J. Mechanical characterisation and small-scale life-cycle assessment of polypropylene macro-fibre blended recycled cardboard concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 409. 133902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133902>.
41. Strozzi M., Smirnov V.V., Pellicano F. Nonlocal anisotropic elastic shell model for vibrations of double-walled carbon nanotubes under nonlinear van der Waals interaction forces. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2022; 146. 104172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104172>.
42. Chen K., Wu J., Yarin A.L. Electrospun membranes filtering 100 nm particles from air flow by means of the van der Waals and Coulomb forces. *Journal of Membrane Science*. 2022; 644.120138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.120138>.

43. Zhang J., Wang C., Zhao H. Dynamic surfaces of latex films and their antifouling applications. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2024; 654(B):1281–1292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.138>.

44. Криницин Н. А., Дубовый В. К., Полякова К. В., Ковернинский И. Н. Исследование влияния вида связующего на свойства фильтровальных стекловолокнистых бумаг для очистки воздуха. *Изв. вузов. Лесн. журн.* 2022; 2: 178–192. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192. Код доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48211760>.

References

1. Vyunkov S. N. Vliyanie karbamida na otverzhdenie karbamidofomal' degidny'x smol. [The effect of urea on the curing of urea-formaldehyde resins]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2019; (226): 155–161. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2019.226.155-161. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37233749>.

2. Vyunkov S. N., Vasiliev V. V. Modifikaciya otverditya karbamidofomal' degidny'x smol s nizkim mol'ny'm sootnosheniem formal' degida k karbamidu. [Modification of the hardener of urea-formaldehyde resins with a low molar ratio of formaldehyde to urea]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2023; (243): 284–296. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.284-296. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53976464>.

3. Fedotov A. A., Vakhnina T. N., Titunin A. A., Sviridov A. V. Issledovanie vliyaniya stabilizatorov na svoystva karbamidofomal' degidnogo svyazuyushhego i fanery' FK. [Investigation of the effect of stabilizers on the properties of urea-formaldehyde binder and FC plywood]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2020; 10(1) (37): 136–144. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42853667>.

4. Leonovich A. A., Sviridov E. A., Glazunova M. G. Poiskovy'e issledovaniya v sozdanii monostrukturny'x drevesnovoloknisty'x plit ponizhennoj goryuchesti. [Exploratory research in the creation of monostructured fiberboard of reduced flammability]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2020; (232): 233–243. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.233-243. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44256696>.

5. Vakhnina T. N., Fedotov A. A., Titunin A. A., Syssoeva I. V. Vliyanie modifikatorov na vremya otverzhdeniya fenoloformal' degidnogo svyazuyushhego dlya pressovaniya fanery' pri nizkotemperaturnom rezhime. [Effect of modifiers on the curing time of phenol-formaldehyde binder for pressing plywood at low temperature]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2019; 9(4) (36): 99–108. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.4/11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41748527>.

6. Fedotov A. A., Vakhnina T. N., Kotikov S. A. Povy'shenie prochnostny'x pokazatelej fanery' FSF putem ispol'zovaniya modifiziruyushhix dobavok k svyazuyushhemu. [Increasing the strength parameters of FSF plywood by using modifying additives to the binder]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2020; 10(1) (37): 124–135. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42853666>.

7. Fedotov A. A., Vakhnina T. N., Kotikov S. A. Vliyanie faktorov processa proizvodstva na pokazateli fanery' na modifitsirovannom fenoloformal' degidnom svyazuyushhem. [Influence of production process factors on plywood performance on modified phenol-formaldehyde binder]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2021; 11(1) (41): 88–100. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44938468>.

8. Nikulina N. S., Dmitrenkov A. I., Tomina E. V., Nikulin S. S., Zhuzhukin K. V. Razrabotka modifiziruyushhix sostavov drevesiny' na osnove pobochny'x produktov proizvodstva polibutadiena i metilmetakrilata [Development of modifying wood compositions based on by-products of polybutadiene and methyl methacrylate production]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2023; (245): 318–330. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.318-330. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768963>.

9. Dmitrenkov A. I., Nikulin S. S., Nikulina N. S., Borovskoi A. M., Nedzelskaya E. A. Issledovanie processa propitki drevesiny' berezy' otrabotanny'm rastitel'ny'm maslom. [Investigation of the process of impregnation of birch wood with used vegetable oil]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2020; 10 (2) (38): 161–168. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/16. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43171823>.

10. Tomina E. V., Dmitrenkov A. I., Zhuzhukin K. V., Khodosova N. A., Mozgovoy N. V. Povy'shenie vodostojkosti drevesiny' propitochny'm sostavom na osnove rastitel'nogo masla s dioksidom kremniya. [Increasing the water resistance of wood with an impregnating composition based on vegetable oil with silicon dioxide]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2021; 11(1) (41): 100–108. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.1/9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44938469>.

zhurnal. 2022; 12(2) (46): 68–79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/6>. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49049979>.

11. Artyomov A. V., Vurasko A. V., Ershova A. S., Buryndin V. G. Vliyanie sodержaniya gidroliznogo lignina na pokazateli otdelochnogo materiala na osnove plastika bez svyazuyushhego. [The effect of hydrolysis lignin content on the performance of plastic-based finishing material without binder]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2023; 245: 293–307. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.293-307. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768961>.

12. Lorentzson A. V., Gevorkyants T. D., Moreva Y. L., Chernoberezhsky Y. M. Temperaturnaya zavisimost' koagulyacionnogo dejstviya $Al_2(SO_4)_3$ na vodnyu dispersiyu sul'fatnogo lignina. [Temperature dependence of coagulation action of $Al_2(SO_4)_3$ on the aqueous dispersion of sulfate lignin]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2023; (245): 308–317. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2023.245.308-317. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54768962>.

13. Diaghileva A. B., Smirnova A. I. Sravnitel'noe issledovanie termostabil'nosti drevesiny', obrabotannoj zol'-gel' kompoziciej na osnove lignina. [Comparative study of the thermal stability of wood treated with a sol-gel composition based on lignin]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2022; (239): 236–247. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.236-247. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49178598>.

14. Belchinskaya L. I., Zhuzhukin K. V., Novikova L. A. Vliyanie ul'trazvukovogo dispergirovaniya propitochnogo sostava drevesiny' na eyo gidrofobizaciyu. [The effect of ultrasonic dispersion of the impregnating composition of wood on its hydrophobization]. *Lesotexnicheskij zhurnal*. 2019; 9(2) (34): 126–136. (In Russ.). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/14. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38472864>.

15. Dubovy V. K., Krinitsyn N. A. Vliyanie sodержaniya i vida svyazuyushhego na prochnost' bumagi iz steklyanny'x volokon. [Influence of the content and type of binder on the strength of glass fiber paper]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2020; (232): 244–251. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.244-251. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44256697>.

16. Dubovy V. K., Suslov G. A. Issledovanie prochnosti sorbcionny'x kompozicionny'x materialov na osnove mikrotonkix steklyanny'x volokon. [Strength study of sorption composite materials based on microfine glass fibers]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotexnicheskoj akademii*. 2020; (233): 221–227. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.221-227. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44489959>.

17. Bagchi S.K., Patnaik R., Rawat I. Beneficiation of paper-pulp industrial wastewater for improved outdoor biomass cultivation and biodiesel production using *Tetrademus obliquus* (Turpin) Kützing. *Renewable Energy*. 2024; 222: 119848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119848>.

18. Sharma D., Sahu S., Singh G. An eco-friendly process for xylose production from waste of pulp and paper industry with xylanase catalyst. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2023; 3: 100024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100024>.

19. Steephen A., Preethi V., Annenewmy B. Solar photocatalytic hydrogen production from pulp and paper wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024; 52(A):1393–1404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.381>.

20. Romani A., Del-Río P.G., Rubira A. Co-valorization of discarded wood pinchips and sludge from the pulp and paper industry for production of advanced biofuels. *Industrial Crops and Products*. 2024; 209: 117992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117992>.

21. Yang M., Li J., Wang S. Status and trends of enzyme cocktails for efficient and ecological production in the pulp and paper industry. *Journal of Cleaner Production*. 2023; 418: 138196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138196>.

22. Axelrod L., Charron P., Tahir I. The effect of pulp production times on the characteristics and properties of hemp-based paper. *Materials Today Communications*. 2023; 34: 104976. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104976>.

23. Taylor N.M., Pilkington G.A., Snow T., Dowding P.J. Surface forces and friction between Langmuir-Blodgett polymer layers in a nonpolar solvent. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2024; 653(B):1432–1443. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.09.146>.
24. Elovenko D., Kräusel V. The study of thermal conductivity of asbestos cardboard and fire clay powder to assess the possibility of their application in prefabricated structures of cylindrical housings of pressure vessels. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 19(5): 2389–2395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.041>.
25. Fitzgerald S.M. Resolving asbestos and ultrafine particulate definitions with carcinogenicity. *Lung Cancer*. 2024; 189. 107478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lungcan.2024.107478>.
26. Obmiński A. Asbestos in building and its destruction. *Construction and Building Materials*. 2020; 249. 118685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118685>
27. Akyzbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023; 8. 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100488>.
28. Avataneo C., Petriglieri J.R., Capella S. Chrysotile asbestos migration in air from contaminated water: An experimental simulation. *Journal of Hazardous Materials*. 2022; 424(C). 127528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127528>.
29. Tan Y., Zou Z., Qu J. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 283. 124637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124637>.
30. Castoldi R.S., Liebscher M., Souza L.M.S. Effect of polymeric fiber coating on the mechanical performance, water absorption, and interfacial bond with cement-based matrices. *Construction and Building Materials*. 2023; 404. 133222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133222>.
31. Bakatovich A., Gaspar F., Boltrushevich N. Thermal insulation material based on reed and straw fibres bonded with sodium silicate and rosin. *Construction and Building Materials*. 2022; 352. 129055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129055>.
32. Geng Y., Nie Y., Du H. Coagulation performance and floc characteristics of Fe–Ti–V ternary inorganic coagulant for organic wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*. 2023; 56. 104344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104344>.
33. Yi J., Chen Z., Xu D. Preparation of a coagulant of polysilicate aluminum ferric from foundry dust and its coagulation performance in treatment of swine wastewater. *Journal of Cleaner Production*. 2024; 434. 140400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140400>.
34. Zeng H., Tang H., Sun W. Deep dewatering of bauxite residue via the synergy of surfactant, coagulant, and flocculant: Effect of surfactants on dewatering and settling properties. *Separation and Purification Technology*. 2022. 302. 122110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122110>.
35. Chen J., Li X., Cai W. High-efficiency extraction of aluminum from low-grade kaolin via a novel low-temperature activation method for the preparation of poly-aluminum-ferric-sulfate coagulant. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 257. 120399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120399>.
36. Karyab H., Ghasemi M., Ghotbinia F. Efficiency of chitosan nanoparticle with polyaluminum chloride in dye removal from aqueous solutions: Optimization through response surface methodology (RSM) and central composite design (CCD). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023; 249. 125977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125977>.
37. Milbrandt A., Zuboy J., Coney K. Paper and cardboard waste in the United States: Geographic, market, and energy assessment. *Waste Management Bulletin*. 2024; 2(1): 21–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.12.002>.
38. Kuffel A., Daeid N.N., Gray A. Comparison of swabbing and cutting-out DNA collection methods from cotton, paper, and cardboard surfaces. *Forensic Science International: Synergy*. 2024; 8. 100453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fsisyn.2023.100453>.

39. Mazaherifar M.H., Coşoreanu C., Timar C.M. Physical and mechanical properties of foam-type panels manufactured from recycled cardboard. *Construction and Building Materials*. 2024; 411. 134685 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134685>

40. Mahdi S., Xie T., Venkatesan S., Gravina R.J. Mechanical characterisation and small-scale life-cycle assessment of polypropylene macro-fibre blended recycled cardboard concrete. *Construction and Building Materials*. 2023; 409. 133902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133902>.

41. Strozzi M., Smirnov V.V., Pellicano F. Nonlocal anisotropic elastic shell model for vibrations of double-walled carbon nanotubes under nonlinear van der Waals interaction forces. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2022; 146. 104172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104172>.

42. Chen K., Wu J., Yarin A.L. Electrospun membranes filtering 100 nm particles from air flow by means of the van der Waals and Coulomb forces. *Journal of Membrane Science*. 2022; 644.120138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.120138>.

43. Zhang J., Wang C., Zhao H. Dynamic surfaces of latex films and their antifouling applications. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2024; 654(B):1281–1292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.10.138>.

44. Krinitsyn N. A., Dubovy V. K., Polyakova K. V., Koverninsky I. N. Issledovanie vliyaniya vida svyazuuyushhego na svoystva fil'troval'ny`x steklovoloknisty`x bumag dlya ochistki vozduxa [Investigation of the effect of the type of binder on the properties of filter fiberglass papers for air purification]. *Izv. vuzov. Lesn. zhurn.* 2022; (2): 178–192. (In Russ.). DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-178-192. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48211760>.

Сведения об авторах

✉ *Мальцев Геннадий Иванович* – доктор техн. наук, проф. кафедры «Химическая технология древесины, биотехнология и наноматериалы», ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0750-0070>, e-mail: maltsewg@yandex.ru.

Юрьев Юрий Леонидович – доктор техн. наук, зав. кафедрой «Химическая технология древесины, биотехнология и наноматериалы», ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», ул. Сибирский тракт, 37, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1187-7401>, e-mail: charekat@mail.ru.

Information about the authors

✉ *Gennady I. Maltsev* – Dr. Sci. (Techn.), Professor of the Department "Chemical technology of wood, biotechnology and nanomaterials", Siberian tract, 37, Yekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0750-0070>, e-mail: maltsewg@yandex.ru.

Yuri L. Yuryev – Dr. Sci. (Techn.), Head of the Department "Chemical technology of wood, biotechnology and nanomaterials", Siberian tract, 37, Yekaterinburg, Russian Federation, 620100, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1187-7401>, e-mail: charekat@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author