

Леса России и хозяйство в них. 2024. № 2 (89). С. 145–156.

Forests of Russia and economy in them. 2024. № 2 (89). P. 145–156.

Научная статья

УДК 544.777:622.367.62

DOI: 10.51318/FRET.2024.89.2.016

ПРИМЕНЕНИЕ БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНЫХ ЛАТЕКСОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БУМАГОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Геннадий Иванович Мальцев¹, Юрий Леонидович Юрьев²

^{1,2} Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

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

² charekat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1187-7401>

Аннотация. Цель исследования – влияние концентрации и природы синтетических бутадиен-стирольных латексов на физико-механические свойства бумагоподобного материала на основе минеральных волокон. Методология проведения работы заключалась в изготовлении и испытании лабораторных образцов отливок асбестового картона, полученных из композиции состава, мас. ч.: 100 – асбестовое волокно сорта М-4-20; 10–50 – бутадиен-стирольные латексы БС-50, СКС-65ГП, БС-65ГПН для проклейки асбестового волокна сорта М-4-20; 3–10 – сульфат алюминия в качестве коагулянта. Механические и гидрофобные свойства полученного материала характеризуют физико-механические показатели: разрывная длина L , м; сопротивление раздиранию E , мН; сопротивление продавливанию P_o , кПа; впитываемость при одностороннем смачивании G , г/м²; капиллярная впитываемость B , мм; степень проклейки C , с/мм. Результаты работы: механическая прочность отливок убывает в ряду исследованных бутадиен-стирольных латексов БС-65ГПН > СКС-65ГП > БС-50 исходя из максимальных значений разрывной длины L , м: 553 > 330 > 94. Выявлена экстремальная зависимость разрывной длины L от содержания связующего для БС-65ГПН и БС-50, эмульгированных солями слабых кислот (дрезинат и парафинат кальция): максимальные значения L соответствуют невысокой концентрации латексов (10–20 мас. ч.) и коагулянта $Al_2(SO_4)_3$ (3–6 мас. ч.). Наличие в составе эмульгатора латекса БС-65ГПН неионогенного ПАВ ОП-7 (3 мас. ч.) увеличивает прочность асбокартона. Образцы асбокартона при равномерном осаждении латекса на волокне обладают рыхлой структурой, положительное влияние на прочность будет оказывать длина волокон и число межволоконных связей. Гидрофобные свойства материала в интервале концентраций связующего 5–40 мас. ч. улучшаются: показатели G и B уменьшаются в основном при содержании латекса 5–20 мас. ч. Наибольшие значения степени проклейки $C = 403$ с/мм выявлены для БС-65ГПН, наименьшие $C = 49$ с/мм – для асбокартона с БС-50. Область применения результатов – разработка технологий получения бумагоподобных материалов на основе минеральных волокон.

Выводы: по совокупности основных физико-механических показателей отливок среди бутадиен-стирольных латексов лучшим для производства асбестового картона является БС-65ГПН.

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

Для цитирования: Мальцев Г. И., Юрьев Ю. Л. Применение бутадиен-стирольных латексов при изготовлении бумагоподобных материалов // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 2 (89). С. 145–156.

Original article

THE USE OF STYRENE-BUTADIENE LATEXES IN THE MANUFACTURE OF PAPER-LIKE MATERIALS

Gennady I. Maltsev¹, Yury L. Yuryev²

^{1,2} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

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

² charekat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1187-7401>

Abstract. The aim of the study is to influence the concentration and nature of synthetic styrene-butadiene latexes on the physical and mechanical properties of a paper-like material based on mineral fibers. The methodology of the work consisted in the manufacture and testing of laboratory samples of asbestos cardboard castings obtained from the composition of the composition, mass part: 100 – asbestos fiber grade M-4-20; 10–50 – styrene butadiene latexes BS-50, SCS-65GP, BS-65GPN; for sizing asbestos fiber grade M-4-20; 3–10 – aluminum sulfate as a coagulant. The mechanical and hydrophobic properties of the resulting material characterize the physico-mechanical parameters: breaking length L , m; tear resistance E , mN; penetration resistance P_o , kPa; absorbency with unilateral wetting G , g/m²; capillary absorbency B , mm; degree of sizing C , s/mm. Results of the work: the mechanical strength of castings decreases among the studied styrene-butadiene latexes: BS-65GPN > SCS-65GP > BS-50, based on the maximum values of the breaking length L , m: 553 > 330 > 94. An extreme dependence of the breaking length L on the binder content for BS-65GPN and BS-50 emulsified with salts of weak acids (potassium drezinate and paraffinate) was revealed: the maximum values of L correspond to a low concentration of latexes (10–20 mass part) and coagulant Al₂(SO₄)₃ (3–6 mass part). The presence of nonionic surfactant OP-7 (3 mass part) in the composition of latex emulsifier BS-65GPN increases the strength of the asbestos board. Samples of asbestos cardboard with uniform deposition of latex on the fiber have a loose structure, the length of the fibers and the number of fiber-to-fiber bonds will have a positive effect on strength. The hydrophobic properties of the material in the range of binder concentrations 5–40 mass part are improved: G and B indicators decrease, mainly with a latex content of 5–20 mass part. The highest values of the degree of sizing $C = 403$ s/mm were found for BS-65GPN, the lowest $C = 49$ s/mm – for asbestos cardboard with BS-50. The field of application of the results is the development of technologies for the production of paper-like materials based on mineral fibers.

Conclusions: according to the totality of the main physical and mechanical parameters of castings among styrene-butadiene latexes, BS-65GPN is the best for the production of asbestos cardboard.

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

For citation: Maltsev G. I., Yuryev Yu. L. The use of styrene-butadiene latexes in the manufacture of paper-like materials // Forests of Russia and economy in them. 2024. № 2 (89). P. 145–156.

Введение

Технологические процессы производства целлюлозы и бумаги, а также 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 (Bagchi et al., 2024; Sharma et al., 2023; Steephen et al., 2024).

Для уменьшения антропогенного воздействия на окружающую среду предприятий целлюлозно-бумажной промышленности необходимо осуществление комплекса природоохранных мероприятий, включающих разработку экологически чистых (малоотходных и безотходных) технологических процессов, применение нового оборудования и видов сырья, обезвреживание и ликвидацию опасных отходов (Romaní et al., 2024; Yang et al., 2023; Axelrod et al., 2023).

Ключевой задачей при создании экологически чистых производств является разработка и внедрение принципиально новых, нетрадиционных технологических процессов и оборудования. Новые технологии позволяют решать проблемы комплексного использования сырьевых и энергетических ресурсов, существенно снижать материалоемкость, энергоемкость и трудоемкость производства за счет широкого использования современных 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) (Дерягин и др., 1985).

При разработке экологически безопасных технологий изготавливают новые конструктивные материалы, в частности асбестовый картон различного технического назначения (покровные материалы для защиты теплоизоляции трубопроводов и оборудования; биологически стойкая под-

основа для линолеума и кровельных материалов; облицовочный ламинат и др.), обладающий высокой негорючестью, устойчивостью в воде и агрессивных средах (Elovenko, Kräusel, 2019; Modica et al., 1983; Obmiński, 2020). Разрабатываемые технологии позволят утилизировать ограниченно используемый низкосортный коротковолокнистый хризотил-асбест, по запасам которого Российская Федерация занимает второе место в мире (Akyzbekov et al., 2023; Avataneo et al., 2023; Tan et al., 2021). Предусматривается использование в качестве регуляторов агрегативной и сорбционной устойчивости дисперсной фазы проклеивающих агентов (синтетические латексы, реагенты на основе канифоли) смешанных Al-Fe- и Fe-содержащих коагулянтов, полученных из природных видов сырья (нефелины, бокситы, каолины, алузиты) и промышленных отходов (красные шламы производства глинозема, некондиционные железные руды высокожелезистые бокситы, колчеданные огарки), что является альтернативой дорогим сульфату алюминия и гидроксиду алюминия – полупродукту производства металлического алюминия (Castoldi et al., 2023; Bakatovich et al., 2022, Geng et al., 2023; Yi et al., 2024; Zeng et al., 2022; Chen et al., 2020).

Проклейка – процесс придания бумаге и картону заданной впитывающей способности, являющейся результатом сложных коллоидно-химических взаимодействий волокнистых, гидрофобизирующих, наполняющих и коагулирующих материалов (Губарев, 2000). Большое влияние на потребительские свойства фабриката оказывают условия проклейки: агрегативная и адсорбционная устойчивость дисперсий; поверхностное натяжение; вязкость; температура; pH; жесткость производственной воды; степень гидрофобности поверхности частиц и др. (Москвитин, 1974; Энгельгардт и др., 1975; Фляте, 1986).

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 (Дубовый, 2000; Машины..., 1973).

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. 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 (Еркова, Чечик, 1983).

Цель, задача, методика и объекты исследования

Цель исследования – влияние концентрации и природы синтетических латексов на физико-механические свойства бумагоподобного материала – асбестового картона. В качестве связующих рассмотрена возможность применения бутадиен-стирольных латексов БС-50, СКС-65ГП, БС-65ГПН для проклейки асбестового волокна сорта М-4-20; в качестве коагулянта использовали сульфат алюминия. Навеску 100 г хризотил-асбеста распускали при перемешивании в 0,5 дм³ воды в течение 5 мин, затем добавляли 10–60 г латекса, после чего через 5 мин вводили раствор коагулянта, содержащий 3–10 г сульфата алюминия. После окончания проклейки в течение 10 мин волокнистую суспензию помещали в лабораторный листоотливной аппарат ТАРПИ. Полученную отливку сушили до постоянного веса, затем определяли основные физико-механические показатели образца асбокартона: разрывную длину L , м; сопротивление раздиранию E , мН; сопротивление продавливанию $P_{\text{о}}$, кПа; впитываемость при одностороннем смачивании G , г/м²; капиллярную впитываемость B , мм; степень проклейки C , с/мм.

Результаты исследования

Результаты выполненного исследования представлены на рис. 1–3. Максимальная разрывная длина отливок L , м: 553, 330, 94, убывает в ряду

латексов: БС-65ГПН > СКС-65ГП > БС-50. Звенья стирола распределены в макромолекуле бутадиен-стирольных латексов нерегулярно, что является причиной невысокой способности цепей сополимеров к взаимной ориентации. По мере увеличения содержания стирола в смеси мономеров уровень нерегулярности строения полимерной цепи понижается, поскольку стирольные звенья в цепи могут присоединяться в двух положениях: голова – хвост и голова – голова, а бутадиеновые – в четырех: цис- и транс-1,4 и 1,2 в положении голова – хвост и голова – голова. Поэтому с увеличением стирольных звеньев в составе сополимера у СКС-65ГП и БС-65ГПН по сравнению с таковым у БС-50 повышается способность к взаимной ориентации цепей и возрастает прочность пленок с утратой эластичных свойств.

Выявлена экстремальная зависимость L от содержания связующего для БС-65ГПН и БС-50, эмульгированных солями слабых кислот (дрезинат и парафинат калия): максимальные значения L соответствуют невысокой концентрации латексов (10–20 мас. ч.) и коагулянта $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (3–6 мас. ч.), что связано с равномерным осаждением латексов с невысокой агрегативной устойчивостью на асбесте. При концентрациях связующего и коагулянта свыше соответственно 20 и 6 мас. ч. и усилении гомокоагуляции латекса, комкования волокнистой массы разрывная длина отливок уменьшается.

Наличие в составе эмульгатора латекса БС-65ГПН неионогенного ПАВ ОП-7 (3 мас. ч.), повышающего агрегативную устойчивость связующего к электролитам и понижающего адгезионное взаимодействие с асбестом, увеличивает прочность асбокартона за счет более равномерного осаждения латекса на волокне.

При синтезе латекса СКС-65ГП использованы натриевые соли сильной моно-, ди- и трибутилнафталинсульфокислоты, обеспечивающие высокую агрегативную устойчивость связующего и неравномерное распределение латекса на волокне. В результате отсутствует монотонно изменяющаяся зависимость разрывной длины от содержания латекса и более низкие значения L по сравнению с таковыми латекса БС-65ГПН.

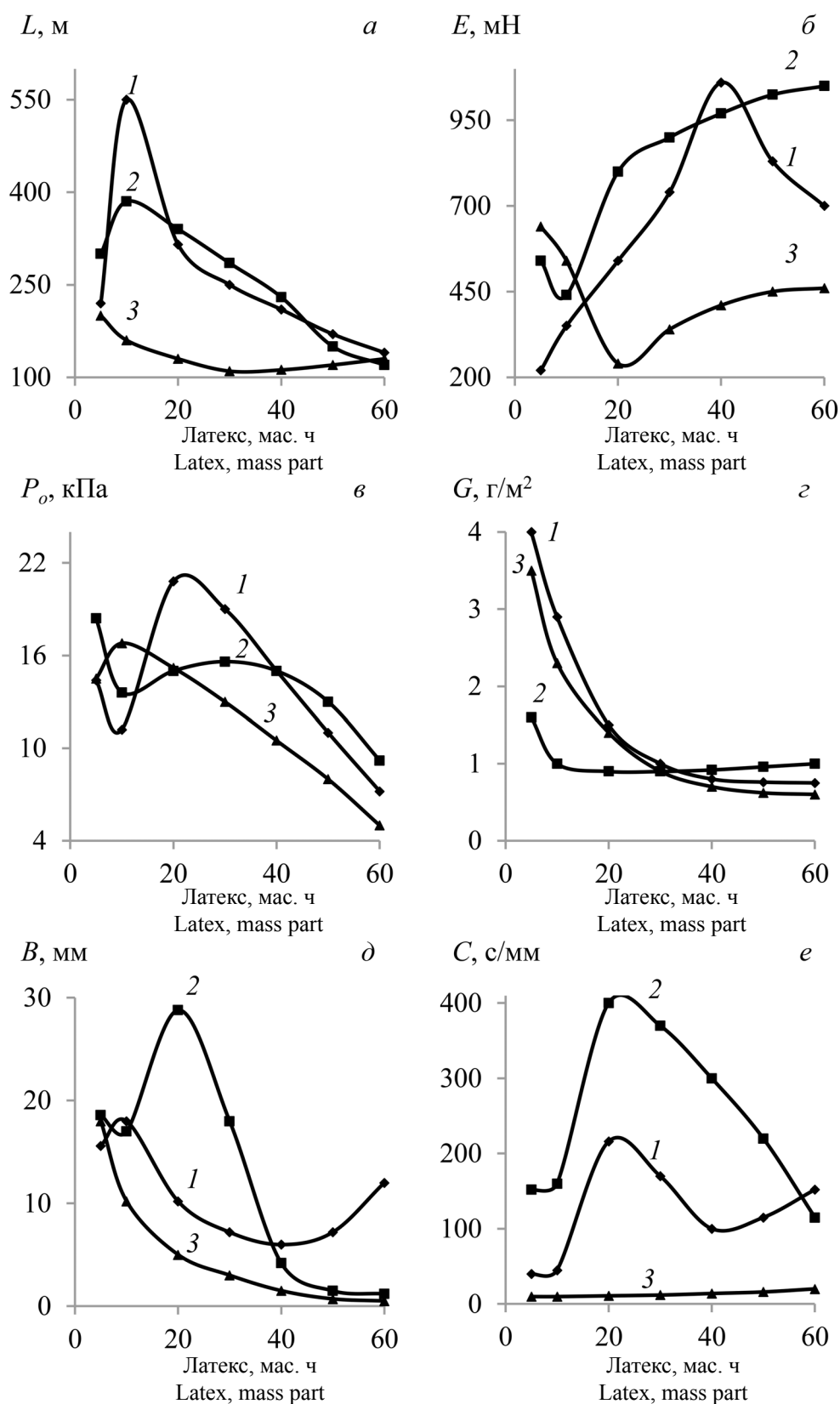


Рис. 1. Зависимость физико-механических показателей картона от содержания латекса БС-65ГПН и сульфата алюминия, мас. ч.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)
 Fig. 1. Dependence of physical and mechanical parameters of cardboard on the content of latex BS-65GPN and aluminum sulfate, mass part: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)

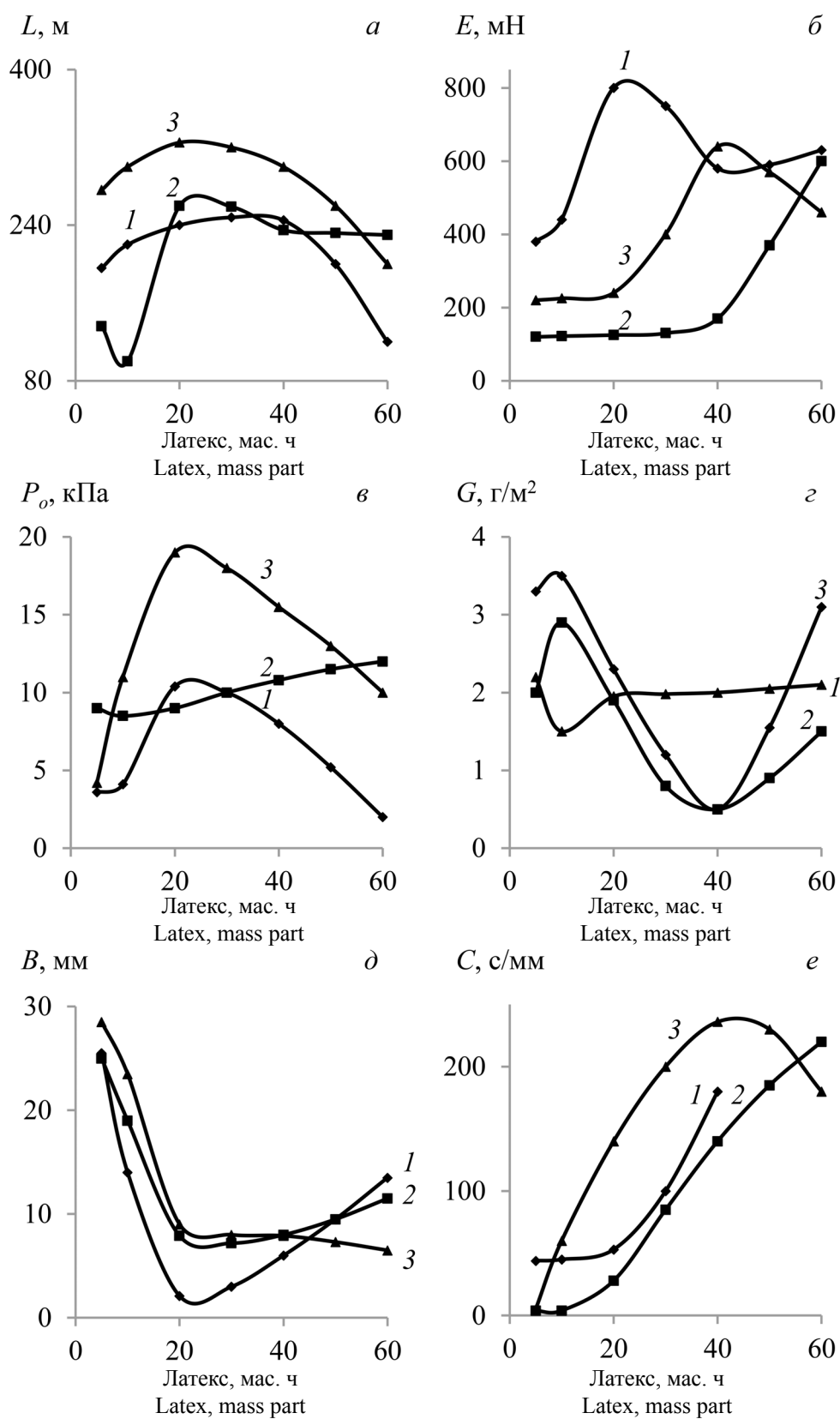


Рис. 2. Зависимость физико-механических показателей картона от содержания латекса SKS-65GP и сульфата алюминия, мас. ч.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)
 Fig. 2. Dependence of physical and mechanical parameters of cardboard on the content of latex SKS-65GP and aluminum sulfate, mass part: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)

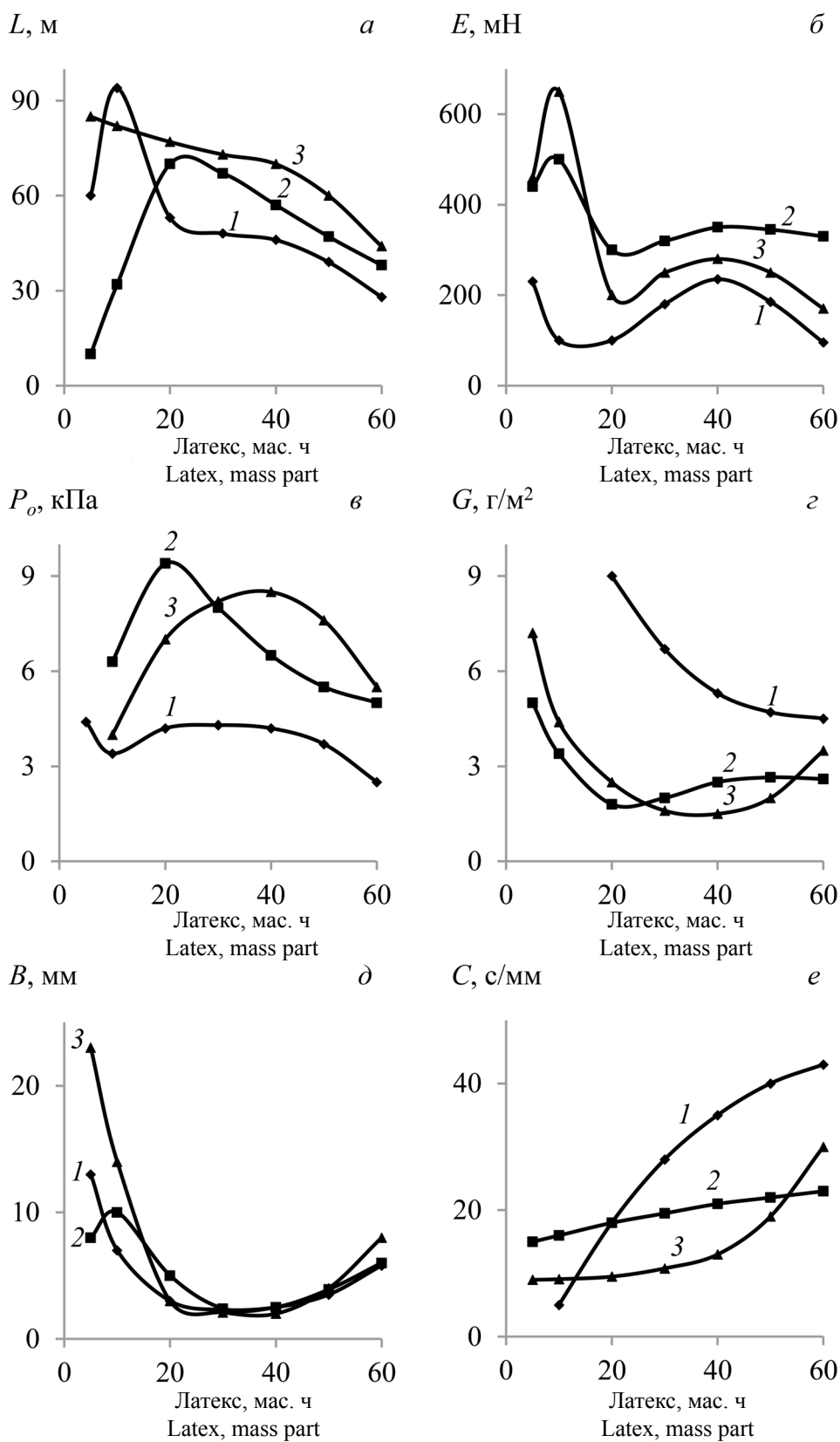


Рис. 3. Зависимость физико-механических показателей картона от содержания латекса БС-50 и сульфата алюминия, мас. ч.: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)
 Fig. 3. Dependence of physical and mechanical parameters of cardboard on the content of latex BS-50 and aluminum sulfate, mass part: 3,0 (1); 6,0 (2); 10,0 (3)

Образцы асбокартона при равномерном осаждении латекса на волокне обладают рыхлой структурой, когда собственная прочность волокна мало влияет на прочность при разрыве, в частности на L . При разрыве листа под действием растягивающего усилия большинство волокон будет не рваться, а вытаскиваться из листа. При этом положительное влияние на прочность будет оказывать длина волокон и число межволоконных связей, которые увеличиваются с уменьшением грубости волокон и возрастанием количества латекса, равномерно осажденного на асбесте (см. кривые 1, 2 рис. 1, а, 3, а). В случае преобладания гомокоагуляции связующего и комкования волокнистой массы L зависит от собственной прочности волокон: этим объясняется отсутствие зависимости L от содержания латекса в асбокартоне (см. кривые 1–3 рис. 2, а; кривые 3 рис. 1, а, 3, а). Итак, при равномерном осаждении небольших количеств латекса (5–20 мас. ч.) на асбесте и образовании однородной структуры отливки с высокой плотностью и небольшим удельным объемом (пухлость) с множеством межволоконных связей, что подобно увеличению длины волокон, сопротивление раздиранию E уменьшается (см. кривая 2 рис. 1, б, кривые 1, 2 рис. 3, б).

При более высоких концентрациях связующего, гомокоагуляции латекса, комковании волокнистой массы, когда структура асбокартона разупорядочивается, пухлость листа возрастает за счет загробления волокна, например: удельный объем отливок с БС-50 (5–60 мас. ч.) и $Al_2(SO_4)_3$ (3, 10 мас. ч.) в зависимости от содержания коагулянта равен 0,9–1,15 и 1,54–1,64 см³/г. Грубые волокна лучше распределяют прилагаемое к образцу усилие, и показатель E возрастает (см. кривые 1, 2 рис. 1, б, кривая 2 рис. 3, б). Максимальные значения E 1064–1084 мН установлены для отливок с БС-65ГПН, а наименьшие $E = 644$ мН – для асбокартона с БС-50; величины E и L для образцов с СКС-65ГП занимают промежуточное положение.

При малом содержании связующего (5–10 мас. ч.), равномерном осаждении латекса на волокне, уменьшении удельного объема волокон сопротивление продавливанию P_o снижается

(см. кривые 1, 2 рис. 1, в, и 3, в). При увеличении количества латекса до 20 мас. ч., возрастании числа межволоконных связей – средней длины волокна – значения P_o растут. При дальнейшем увеличении содержания связующего показатель P_o уменьшается пропорционально изменению L , так как увеличивается грубость волокон, уменьшается их длина при гомокоагуляции латекса и комковании волокнистой массы. Наибольшие значения $P_o = 21$ кПа – у отливок с БС-65ГПН, наименьшие величины $P_o = 9,7$ кПа – у БС-50.

Гидрофобные свойства материала в интервале концентраций связующего 5–40 мас. ч. улучшаются: показатели G и B уменьшаются в основном при содержании латекса 5–20 мас. ч., что связано с первоначальным изменением пухлости отливок и не зависит от характера осаждения латекса на волокне (см. рис. 2, з, д). Отсюда гидрофобные свойства асбокартона определяются количеством латекса в отливке: значения G и B – величины одного порядка для всех исследованных бутадиен-стирольных латексов. При увеличении содержания связующего до 60 мас. ч. усиление гидрофобных свойств асбокартона связано с разупорядочиванием структуры материала при ухудшении проклейки асбеста латексом из-за гомокоагуляции латекса и комкования волокнистой массы.

Показатель степени проклейки C – по сути, обратная величина B , что иллюстрирует зависимость C – содержание СКС-65ГП, когда по мере увеличения концентрации латекса значения C возрастают (см. рис. 2, е). Наибольшие значения $C = 403$ с/мм выявлены для БС-65ГПН, наименьшие $C = 49$ с/мм – для асбокартона с БС-50. Отсюда по совокупности основных физико-механических показателей отливок среди бутадиен-стирольных латексов лучшим для производства асбестового картона является БС-65ГПН.

Выводы

1. Механическая прочность отливок убывает в ряду исследованных бутадиен-стирольных латексов БС-65ГПН > СКС-65ГП > БС-50 исходя из максимальных значений разрывной длины L , м: 553 > 330 > 94. С увеличением содержания стирольных звеньев в составе сополимера у БС-65ГПН

и СКС-65ГП по сравнению с таковым у БС-50 повышается способность к взаимной ориентации цепей и возрастает прочность пленок с утратой эластичных свойств.

2. Выявлена экстремальная зависимость разрывной длины L от содержания связующего для БС-65ГПН и БС-50, эмульгированных солями слабых кислот (дрезинат и парафинат калия): максимальные значения L соответствуют невысокой концентрации латексов (10–20 мас. ч.) и коагулянта $Al_2(SO_4)_3$ (3–6 мас. ч.), что связано с равномерным осаждением латексов с невысокой агрегативной устойчивостью на асбесте.

3. Наличие в составе эмульгатора латекса БС-65ГПН неионогенного ПАВ ОП-7 (3 мас. ч.), повышающего агрегативную устойчивость связующего к электролитам и понижающего адгезионное взаимодействие с асбестом, увеличивает прочность асбокартона за счет более равномерного осаждения латекса на волокне.

4. Образцы асбокартона при равномерном осаждении латекса на волокне обладают рыхлой структурой, когда собственная прочность волокна мало влияет на прочность при разрыве, в частности на L . При разрыве листа под действием растягивающего усилия большинство волокон будет не рваться, а вытаскиваться из листа. При этом поло-

жительное влияние на прочность будет оказывать длина волокон и число межволоконных связей, которые увеличиваются с уменьшением грубости волокон и возрастанием количества латекса, равномерно осажженного на асбесте.

5. Гидрофобные свойства материала в интервале концентраций связующего 5–40 мас. ч. улучшаются: показатели G и B уменьшаются в основном при содержании латекса 5–20 мас. ч., что связано с первоначальным изменением пухлости отливок и не зависит от характера осаждения латекса на волокне. Отсюда гидрофобные свойства асбокартона определяются количеством латекса в отливке: значения G и B – величины одного порядка для всех исследованных бутадиен-стирольных латексов.

6. Показатель степени проклейки C иллюстрирует зависимость C – содержание СКС-65ГП, когда по мере увеличения концентрации латекса значения C возрастают. Наибольшие значения $C=403$ с/мм выявлены для БС-65ГПН, наименьшие $C=49$ с/мм – для асбокартона с БС-50. Отсюда по совокупности основных физико-механических показателей отливок среди бутадиен-стирольных латексов лучшим для производства асбестового картона является БС-65ГПН.

Список источников

- Губарев А. А. Проклейка бумаги и картона в нейтральной среде с использованием серноокислого алюминия : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.21.03 / Губарев Александр Александрович. Минск, 2000. 23 с.
- Дерягин Б. В., Чураев М. В., Муллер В. М. Поверхностные силы. М. : Наука, 1985. 398 с.
- Дубовый В. К. Бумагоподобные композиционные материалы на основе минеральных волокон : дис... д-ра техн. наук : 05.21.03 / Дубовый Владимир Климентьевич. СПб., 2000. 370 с.
- Еркова Л. Н., Чечик О. С. Латексы. Л. : Химия, 1983. 224 с.
- Машины, процессы и оборудование целлюлозно-бумажных производств : сб. ст. Вып. 29 / отв. ред. А. И. Бродоцкий. Л. : ЛТИ ЦБП, 1973. 185 с.
- Москвитин Н. И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания. М. : Лесн. пром-сть, 1974. 192 с.
- Фляте Д. М. Свойства бумаги. М. : Лесн. пром-сть, 1986. 680 с.
- Энгельгардт Г., Гранич К., Риттер К. Проклейка бумаги. М. : Лесн. пром-сть, 1975. 224 с.
- Akylbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. 2023. Vol. 8. P. 100488. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100488

- Avataneo C., Petriglieri J. R., Capella S.* Chrysotile asbestos migration in air from contaminated water: An experimental simulation // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 424. Part C. P. 127528. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127528
- 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. Vol. 34. P. 104976. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104976
- 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. Vol. 222. P. 119848. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119848
- 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. Vol. 352. P. 129055. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055
- 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. Vol. 404. P. 133222. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133222
- 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. Vol. 257. P. 120399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120399
- 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. Vol. 19. Part 5. P. 2389–2395. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.041.
- 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. Vol. 56. P. 104344. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104344
- Modica G., Giuffrè L., Montoneri E.* Electrolytic separators from asbestos cardboard: A flexible technique to obtain reinforced diaphragms or ion-selective membranes // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1983. Vol. 8. Iss. 6. P. 419–435. DOI: 10.1016/0360-3199(83)90163-5
- Obmiński A.* Asbestos in building and its destruction // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 249. P. 118685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118685
- 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. Vol. 209. P. 117992. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117992
- 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. Vol. 3. P. 100024. DOI: 10.1016/j.scenv.2023.100024
- Stephen A., Preethi V., Annenewmy B.* Solar photocatalytic hydrogen production from pulp and paper wastewater // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52. Part A. P. 1393–1404. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.381
- 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. Vol. 283. P. 124637. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124637
- 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. Vol. 418. P. 138196. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138196
- 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. Vol. 434. P. 140400. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140400

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. Vol. 302. P. 122110. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122110

References

- Akylbekov Y., Shevko V., Karatayeva G. Thermodynamic prediction of the possibility of comprehensive processing chrysotile-asbestos waste // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2023. Vol. 8. P. 100488. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100488
- Avataneo C., Petriglieri J. R., Capella S. Chrysotile asbestos migration in air from contaminated water: An experimental simulation // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 424. Part C. P. 127528. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127528
- 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. Vol. 34. P. 104976. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104976
- 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. Vol. 222. P. 119848. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119848
- 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. Vol. 352. P. 129055. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129055
- 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. Vol. 404. P. 133222. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133222
- 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. Vol. 257. P. 120399. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120399
- Deryagin B. V., Churaev M. V., Muller V. M. *Surface forces*. M.: Nauka, 1985. 398 p.
- Dubovy V. K. Paper-like composite materials based on mineral fibers: Dis. ... doct. Technical sciences: 05.21.03. St. Petersburg, 2000. 370 p.
- 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. Vol. 19. Part 5. P. 2389–2395. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.041
- Engelhardt G., Border K., Ritter K. *Paper sizing*. M.: Forest industry, 1975. 224 p.
- 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. Vol. 56. P. 104344. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104344
- Gubarev A. A. *Gluing of paper and cardboard in a neutral environment using aluminum sulfate*: Abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.21.03. Minsk, 2000. 23 p.
- Flate D. M. *Properties of paper*. M.: Forest industry, 1986. 680 p.
- Machines, processes and equipment of pulp and paper industries: Collection of articles. Issue 29* / Ed. by A. I. Broditsky. Leningrad: LTI CBP, 1973. 185 p.
- Modica G., Giuffrè L., Montoneri E. Electrolytic separators from asbestos cardboard: A flexible technique to obtain reinforced diaphragms or ion-selective membranes // *International Journal of Hydrogen Energy*. 1983. Vol. 8. Iss. 6. P. 419–435. DOI: 10.1016/0360-3199(83)90163-5
- Moskvitin N. I. *Physico-chemical bases of gluing and sticking processes*. M.: Forest industry, 1974. 192 p.

- Obmiński A.* Asbestos in building and its destruction // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 249. P. 118685. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118685
- 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. Vol. 209. P. 117992. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117992
- 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. Vol. 3. P. 100024. DOI: 10.1016/j.scenv.2023.100024
- Steephen A., Preethi V., Annenewmy B.* Solar photocatalytic hydrogen production from pulp and paper wastewater // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024. Vol. 52. Part A. P. 1393–1404. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.381
- 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. Vol. 283. P. 124637. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124637
- 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. Vol. 418. P. 138196. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138196
- Yerkova L. N., Chechik O. S.* Latexes. Leningrad : Chemistry, 1983. 224 p.
- 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. Vol. 434. P. 140400. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140400
- 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. Vol. 302. P. 122110. DOI: 10.1016/j.seppur.2022.122110

Информация об авторах

Г. И. Мальцев – доктор технических наук, старший научный сотрудник;

Ю. Л. Юрьев – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

G. I. Maltsev – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher;

Yu. L. Yuryev – Doctor of Technical Sciences, Professor.

Статья поступила в редакцию 01.02.2024; принята к публикации 29.02.2024.

The article was submitted 01.02.2024; accepted for publication 29.02.2024.
