ОРГАНИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Статья поступила в редакцию: 24.09.2026
Статья принята к публикации: 01.10.2026
Статья опубликована: 07.11.2026

УДК 678.652+532.135

DOI: 10.32743/UniChem.2026.149.11.23496

Синтез и реологические свойства карбамидоформальдегидного связующего, модифицированного крахмалом и карбоксиметилцеллюлозой

Жалилов Шерали Негбоевич
д-р хим. наук, доц.
кафедры Химия и технология нефти и газа, Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: sh.jalilov@gmail.com
Кароматов Сардор Аминович
ст. преп. кафедры
Химия и технология нефти и газа, Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Нуриддинова Гулрой Амриддиновна
докторант кафедры
Химия и технология нефти и газа, Бухарский государственный университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Рубидинов Шохрух Гайратжон угли
PhD, доц.
кафедры технологии машиностроения, Ферганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Фергана

Synthesis and rheological properties of a urea–formaldehyde binder modified with starch and carboxymethylcellulose

Zhalilov Sherali Negboevich
DSc, Associate Professor
Department of Chemistry and Technology of Oil and Gas, Bukhara State University
Republic of Uzbekistan, Bukhara
Karomatov Sardor Aminovich
senior Lecturer
Department of Chemistry and Technology of Oil and Gas, Bukhara State University
Republic of Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Синтез и реологические свойства карбамидоформальдегидного связующего, модифицированного крахмалом и карбоксиметилцеллюлозой // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Жалилов Ш.Н. [и др.]. 2026. 11(149). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23496

Nuriddinova Gulroy Amriddinovna
Doctoral Student
Department of Chemistry and Technology of Oil and Gas, Bukhara State University
Republic of Uzbekistan, Bukhara
Rubidinov Shokhrukh Gayratjon ugli
PhD, Associate Professor
Department of Mechanical Engineering Technology, Fergana State Technical University
Republic of Uzbekistan, Fergana

Аннотация

В настоящем исследовании комплексно изучены технология синтеза и реологические свойства карбамидоформальдегидного связующего, модифицированного крахмалом и карбоксиметилцеллюлозой (КМЦ). В процессе исследования в состав карбамидоформальдегидной смолы были введены меламин, крахмал, КМЦ, полиакриламид (ПАА) и эпихлоргидрин (ЭХГ), в результате чего получено новое композиционное связующее. Проведен научный анализ процесса желатинизации крахмала, взаимодействия КМЦ и ПАА в полимерной системе, механизма формирования вязкости, а также их влияния на вязкость по Брукфильду, время гелеобразования и продолжительность отверждения. Полученные результаты показали, что синергетическое воздействие крахмала и КМЦ способствует существенному повышению реологической стабильности, клеящей способности и эксплуатационных характеристик связующего. Предложенное композиционное связующее рекомендуется в качестве перспективного материала для применения в производстве древесностружечных плит (ДСП), древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ) и древесноволокнистых плит (ДВП). Последовательность синтеза и физико-реологические показатели, использованные в настоящей статье, были разработаны и систематизированы на основе лабораторных данных. Практическая значимость исследования состоит в обосновании состава связующего, обеспечивающего регулируемую вязкость, устойчивость при хранении и технологическую стабильность при изготовлении древесных композиционных плит.

Abstract

This study investigates the synthesis and rheological properties of a urea–formaldehyde binder modified with starch and carboxymethyl cellulose (CMC). A new composite binder was prepared by incorporating melamine, starch, CMC, polyacrylamide (PAA), and epichlorohydrin (ECH) into a urea–formaldehyde resin. Particular attention was paid to starch gelatinization, the interaction of CMC and PAA within the polymer system, the mechanism of viscosity development, and the effects of the modifiers on Brookfield viscosity, gelation time, and curing time. The laboratory results showed that the synergistic action of starch and CMC considerably improved the rheological stability, bonding performance, and functional properties of the binder. The developed composite binder can be considered a promising material for the production of particleboard, medium-density fibreboard (MDF), and fibreboard. The synthesis procedure and physicochemical and rheological parameters presented in this study were developed and systematized using

laboratory data. The practical significance of the study lies in substantiating a binder composition that provides controlled viscosity, storage stability, and reliable processing performance in the manufacture of wood-based composite panels.

Ключевые слова: карбамидоформальдегидная смола, модифицированное связующее, крахмал, карбоксиметилцеллюлоза, реологические свойства, вязкость по Брукфильду.

Keywords: urea–formaldehyde resin, modified binder, starch, carboxymethyl cellulose, rheological properties, Brookfield viscosity.

Введение

В связи с ежегодным увеличением объёмов производства древесных композиционных материалов в мире существенно повышаются требования к связующим системам, используемым при их изготовлении. В частности, качество древесностружечных плит (ДСП), древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ) и древесноволокнистых плит (ДВП), применяемых в мебельной промышленности, строительстве, производстве отделочных материалов и конструкционных панелей, непосредственно зависит от физико-химических и реологических свойств связующей смолы. В последние годы разработка связующих с высокой экологической безопасностью, низкой эмиссией формальдегида, повышенной термо- и влагостойкостью, а также высокой клеящей способностью стала одним из приоритетных научных направлений мировой полимерной химии и технологии композиционных материалов [4].

В настоящее время в промышленности наиболее широко применяются карбамидоформальдегидные (КФ), меламиноформальдегидные (МФ) и фенолоформальдегидные (ФФ) смолы. Среди них карбамидоформальдегидные смолы широко используются в качестве основных связующих при производстве древесных композиционных материалов благодаря их низкой стоимости, быстрому отверждению, технологичности и высокой клеящей способности. Однако сравнительно низкая влагостойкость, выделение свободного формальдегида в процессе эксплуатации и повышенная хрупкость данных смол обусловливают необходимость их модификации [3; 4].

Результаты исследований, проводимых в различных странах мира, показывают, что модификация связующих на основе природных полисахаридов является перспективным направлением создания экологически безопасных клеевых систем. В частности, крахмал представляет собой биоразлагаемый, возобновляемый и доступный природный полимер, который благодаря наличию большого количества гидроксильных групп способен образовывать водородные связи с аминопластными смолами. В результате же латинизации крахмала образуется гель, эффективно смачивающий древесные волокна, глубоко проникающий в капиллярную структуру материала и повышающий целостность связующего слоя. Вместе с тем сам крахмал не обладает достаточной водостойкостью, что обусловливает научную и практическую целесообразность его применения совместно с реакционноспособными модификаторами [9].

Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) представляет собой хорошо растворимый в воде высокомолекулярный анионный полимер, широко используемый в качестве реологического модификатора. Основными функциями КМЦ являются регулирование вязкости связующего,

удержание воды, формирование тиксотропных свойств и обеспечение равномерного распределения клеевого слоя. Молекулы КМЦ способны образовывать многочисленные водородные связи с цепями крахмала и полиакриламида, повышая структурную стабильность полимерной системы. В результате связующее проявляет свойства текучей системы при механическом перемешивании и стабильной высоковязкой системы в состоянии покоя.

Полиакриламид (ПАА), в свою очередь, благодаря наличию амидных групп способен формировать межмолекулярные взаимодействия с карбамидоформальдегидными олигомерами. Это способствует повышению когезионной прочности, эластичности и ударостойкости связующего. Кроме того, эпихлоргидрин (ЭХГ) способствует образованию дополнительных ковалентных связей между полимерными цепями, уплотняя пространственную трёхмерную сетчатую структуру. Благодаря этому модифицированная система характеризуется повышенной термо- и влагостойкостью [1; 6].

Несмотря на наличие исследований, посвящённых модификации карбамидоформальдегидных смол различными реакционноспособными компонентами, сведения о комплексном действии крахмала, КМЦ и ПАА при их совместном использовании остаются ограниченными [5; 10]. В связи с этим в настоящем исследовании проведён углублённый анализ реологического и технологического воздействия указанных модификаторов.

Целью исследования является синтез карбамидоформальдегидного связующего, модифицированного крахмалом, КМЦ, ПАА и ЭХГ, оптимизация технологических параметров процесса синтеза, а также научно обоснованная оценка влияния модификаторов на вязкость по Брукфильду, время гелеобразования, время отверждения и общие реологические свойства связующего.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали 37–40 %-ный раствор формальдегида, карбамид, меламин, пищевой крахмал, КМЦ, ПАА и ЭХГ. Синтез связующего осуществляли поэтапно в трёхгорлом лабораторном реакторе.

На первом этапе раствор формальдегида в щелочной среде подвергали реакции метилолирования с карбамидом, после чего в кислой среде проводили стадию поликонденсации. По завершении реакции систему нейтрализовали и вводили меламин.

В отдельной ёмкости при температуре 90 °С осуществляли желатинизацию крахмала, после чего в полученную систему вводили КМЦ и ПАА с образованием однородного геля. Полученную композицию вводили в основную смолу, а на заключительной стадии с использованием ЭХГ формировали дополнительную пространственную сетчатую структуру.

Основные стадии процесса синтеза осуществляли в соответствии с лабораторным технологическим регламентом. Состав и основные свойства модифицированного связующего представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав модифицированного связующего

Компонент	Количество
Формальдегид (37 %)	113,5 г
Карбамид	72 г
Крахмал	12 г
Меламин	3 г
КМЦ	1,5 г
Полиакриламид (ПАА)	1,3 г
Эпихлоргидрин (ЭХГ)	3 г
Дистиллированная вода	120 мл



Рисунок 1. Принципиальная схема синтеза модифицированного карбамидоформальдегидного связующего

Результаты и обсуждение

Влияние крахмала и КМЦ на реологию карбамидоформальдегидной смолы.

Технологическая эффективность карбамидоформальдегидных смол во многом определяется их реологическими свойствами. Реологические показатели являются основными факторами, определяющими равномерность распределения связующего по поверхности древесных частиц, предотвращение его вытекания в процессе прессования, а также возможность управления процессом отверждения. Обычные карбамидоформальдегидные смолы характеризуются относительно низкой вязкостью, вследствие чего их способность удерживаться на поверхности древесины является ограниченной. Для устранения данного недостатка был применён метод модификации с использованием крахмала и КМЦ [7].

При желатинизации крахмала при температуре 90 °C его гранулы набухают, а молекулы амилозы и амилопектина переходят в раствор. Образующийся трёхмерный гель способен формировать водородные связи с карбамидоформальдегидными олигомерами, что приводит к повышению внутренней вязкости системы. В результате связующее глубже проникает в капиллярную структуру древесины, а целостность клеевого слоя повышается [12].

КМЦ, являясь водосвязывающим анионным полимером, обеспечивает равномерное распределение молекул воды в системе и способствует формированию тиксотропных свойств. ПАА, в свою очередь, за счёт амидных групп образует дополнительные водородные связи, повышая прочность полимерной сетки. В результате синергетического воздействия этих трёх модификаторов связующее приобретает высокую структурную стабильность. Данное положение также было подтверждено результатами лабораторных наблюдений [10].

Анализ вязкости по Брукфильду. Вязкость по Брукфильду является одним из наиболее важных технологических показателей древесных связующих. Данный параметр определяет качество нанесения связующего на поверхность древесины, степень его проникновения, а также сохранение клеевого слоя в процессе прессования.

Результаты исследования показали, что вязкость по Брукфильду модифицированного связующего при температуре 25 °C находится в диапазоне 4000–7000 мПа·с, что в несколько раз превышает соответствующий показатель исходной карбамидоформальдегидной смолы. Основными причинами такого повышения являются гелеобразование крахмала, уплотнение молекулярной сетки КМЦ и структурное упрочнение системы за счёт образования водородных связей ПАА.

Повышенная вязкость способствует снижению стекания связующего с поверхности древесины и обеспечивает более равномерное распределение клеевого слоя, что подтверждается данными, представленными в таблице 2.

Таблица 2. Влияние температуры на вязкость по Брукфильду

Температура, °C	Исходная КФ-смола, мПа·с	Модифицированное связующее, мПа·с
20	520–650	6200–7200
30	430–560	5400–6500
40	350–470	4700–5700
50	290–390	3900–4900
60	230–320	3200–4200
70	180–260	2600–3500
80	140–210	2100–2900

Как видно из таблицы, с повышением температуры вязкость связующего снижается. Однако модифицированная система сохраняет технологически приемлемый уровень вязкости во всём исследованном температурном диапазоне. Это обеспечивает возможность равномерного нанесения клеевого состава в условиях производственного процесса.

Анализ времени гелеобразования и процесса отверждения. Время образования геля является одним из основных параметров, определяющих технологическую эффективность связующего в процессе прессования. Слишком короткое время гелеобразования может

привести к преждевременному отверждению клея на технологическом оборудовании, тогда как чрезмерно продолжительное время гелеобразования снижает производительность процесса [2].

В ходе исследования установлено, что время гелеобразования модифицированного связующего составляет 60–90 секунд, а время отверждения — 5–7 минут. Полученные показатели являются технологически приемлемыми и обеспечивают высокую эффективность связующего в производственных условиях.

Введение меламина и эпихлоргидрина способствует уплотнению полимерной сетки и ускорению процесса отверждения, тогда как крахмал и КМЦ обеспечивают регулируемое протекание процесса и увеличивают технологическое время обработки системы [8; 11]. В результате рабочая жизнеспособность связующего увеличивается до 4–6 часов.

Таблица 3. Основные технологические показатели связующего

Показатель	Исходная КФ-смола	Модифицированное связующее
Вязкость по Брукфильду, мПа·с	210–450	4000–7000
Время гелеобразования	5–6 мин.	60–90 с.
Время отверждения	7–10 мин.	5–7 мин.
Рабочая жизнеспособность	2 ч.	4–6 ч.
Срок хранения	20 суток	45–60 суток

Реологический механизм. Реологические свойства предложенного композиционного связующего обусловлены образованием многочисленных водородных связей между молекулами крахмала, КМЦ и ПАА. После желатинизации гранул крахмала цепи амилозы и амилопектина взаимодействуют с карбамидоформальдегидными олигомерами.

Молекулы КМЦ связывают молекулы воды и стабилизируют дисперсную систему. ПАА посредством амидных групп формирует дополнительные межмолекулярные и пространственные взаимодействия. На заключительной стадии ЭХГ вступает в реакцию с функциональными группами полимеров, способствуя формированию ковалентных мостиков между полимерными цепями. В результате формируется плотная трёхмерная пространственная полимерная сетка.

Влияние модификаторов на структурное формирование связующей системы. Физико-химические изменения, происходящие при модификации карбамидоформальдегидных смол, являются одним из основных факторов, определяющих конечные эксплуатационные свойства связующего. В ходе исследования была разработана многокомпонентная модифицирующая система на основе крахмала, КМЦ, ПАА, меламина и ЭХГ.

Несмотря на то, что каждый из указанных компонентов выполняет в связующей системе определённую функцию, их совместное применение обеспечивает выраженный синергетический эффект, в результате которого существенно повышается структурная стабильность полимерной сетки.

В процессе желатинизации крахмал утрачивает исходную гранулярную структуру, а макромолекулы амилозы и амилопектина переходят в раствор. Образующийся гель взаимодействует с карбамидоформальдегидными олигомерами посредством водородных

связей, обеспечивая непрерывность клеевого слоя. Одновременно крахмал глубоко проникает в капиллярную структуру древесины, усиливая механическое сцепление. Данный процесс играет важную роль в повышении прочности адгезионного соединения связующего с поверхностью древесины.

Карбоксиметильные группы, входящие в состав молекул КМЦ, образуют с молекулами воды устойчивую гидратную оболочку. В результате повышается водоудерживающая способность связующего, стабилизируется дисперсная фаза и улучшаются тиксотропные свойства системы. Это имеет особое практическое значение в промышленных условиях при нанесении клея распылением или валковым способом.

Амидные группы молекул ПАА образуют многочисленные водородные связи с карбамидоформальдегидной смолой и молекулами крахмала. В результате повышаются эластичность связующего, прочность внутренних связей и сопротивление образованию трещин.

ЭХГ, благодаря наличию реакционноспособной эпоксидной группы, способен взаимодействовать с гидроксильными и аминными функциональными группами, формируя дополнительные ковалентные связи между полимерными цепями. Это приводит к повышению плотности полимерной сетки и улучшению термо- и влагостойкости связующего.

Функциональное назначение модификаторов

Таблица 4. Основные функции модификаторов в составе композиционного связующего

Модификатор	Основное назначение	Влияние на свойства связующего
Крахмал	Природный полисахарид	Смачивание древесины, проникновение в капилляры, снижение себестоимости
КМЦ	Реологический модификатор	Регулирование вязкости, удержание воды, формирование тиксотропных свойств
ПАА	Структурный упрочнитель	Повышение эластичности, внутренней прочности и плёнкообразования
Меламин	Термостойкий модификатор	Повышение водо- и термостойкости
ЭХГ	Химический сшивающий реагент	Формирование трёхмерной пространственной полимерной сетки

Как видно из таблицы 4, каждый компонент выполняет самостоятельную функцию в связующей системе. Однако их совместное применение обеспечивает выраженный синергетический эффект, что позволяет получить более высокие технологические и эксплуатационные показатели по сравнению с исходной карбамидоформальдегидной смолой.

Заключение

В результате синтеза карбамидоформальдегидного связующего, модифицированного крахмалом и КМЦ, получена новая композиционная система с улучшенными реологическими и технологическими характеристиками. Желатинизация крахмала обеспечивает более глубокое проникновение связующего в капиллярную структуру

древесины, тогда как КМЦ стабилизирует вязкость и способствует формированию тиксотропных свойств. ПАА повышает эластичность системы и прочность внутренних связей, а ЭХГ способствует образованию дополнительных ковалентных связей и уплотнению пространственной полимерной сетки.

Вязкость по Брукфильду модифицированного связующего составляет 4000–7000 мПа·с, время гелеобразования 60–90 секунд, а время отверждения 5–7 минут, что свидетельствует о его технологической пригодности для применения в производственных условиях при изготовлении древесностружечных плит (ДСП), древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ) и древесноволокнистых плит (ДВП).

Кроме того, синергетическое воздействие модифицирующих компонентов способствует повышению стабильности при хранении, клеящей способности и эксплуатационных характеристик связующего по сравнению с исходной карбамидоформальдегидной смолой. Предложенное композиционное связующее благодаря сочетанию экологической приемлемости и улучшенных технологических характеристик может быть рекомендовано в качестве перспективного связующего для производства древесных композиционных материалов.

Список литературы

1. Жалилов Ш.Н., Рубидинов Ш.Г.У. Исследование модификации мочевиноформальдегидной смолы эпихлоргидрином и поливинилхлоридом для повышения свойств древесно-плитных композитов // Universum: технические науки. – 2026. – Т. 4, № 4 (145). – С. 4–10.
2. Kawalerczyk J., Dukarska D., Góral B., Antov P., Dziurka D., Mirski R. Modification of urea-formaldehyde resin with triethylenetetramine: Effect on adhesive properties and plywood strength // Polymers. – 2025. – Т. 17, № 19. – Art. 2652. – DOI: 10.3390/polym17192652.
3. Li B., Zhang J., Ren X.Y., Chang J.M., Gou J.S. Preparation and characterization of bio-oil modified urea-formaldehyde wood adhesives // BioResources. – 2014. – Т. 9. – P. 5125–5133. – DOI: 10.15376/biores.9.3.5125–5133.
4. Li T.H., Liang J.H., Cao M., Guo X.S., Xie X.G., Du G.B. Re-elucidation of the acid-catalyzed urea-formaldehyde reactions: A theoretical and 13C-NMR study // Journal of Applied Polymer Science. – 2016. – Т. 133, № 48. – Art. 44339. – DOI: 10.1002/app.44339.
5. Maulana M.I., Lubis M.A.R., Febrianto F., Hua L.S., Iswanto A.H., Antov P. et al. Environmentally friendly starch-based adhesives for bonding high-performance wood composites: A review // Forests. – 2022. – Т. 13, № 10. – Art. 1614. – DOI: 10.3390/f13101614.
6. Sulaiman N.S., Hashim R., Mohamad Amini M.H., Sulaiman O., Hiziroglu S. Evaluation of the properties of particleboard made using oil palm starch modified with epichlorohydrin // BioResources. – 2013. – Т. 8, № 1. – P. 283–301. – DOI: 10.15376/biores.8.1.283–301.
7. Sulaiman N.S., Hashim R., Sulaiman O., Nasir M., Amini M.H.M., Hiziroglu S. Partial replacement of urea-formaldehyde with modified oil palm starch based adhesive to fabricate particleboard // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2018. – Т. 84. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.02.002.

8. Tohmura S.I., Inoue A., Sahari S.H. Influence of the melamine content in melamine-urea-formaldehyde resins on formaldehyde emission and cured resin structure // Journal of Wood Science. – 2001. – T. 47, № 6. – P. 451–457. – DOI: 10.1007/BF00767897.
9. Wang H., Liang J., Zhang J., Zhou X., Du G. Performance of urea-formaldehyde adhesive with oxidized cassava starch // BioResources. – 2017. – T. 12, № 4. – P. 7590–7600. – DOI: 10.15376/biores.12.4.7590–7600.
10. Yang H., Wang H., Du G., Ni K., Wu Y., Su H. et al. Ureido hyperbranched polymer modified urea-formaldehyde resin as high-performance particleboard adhesive // Materials. – 2023. – T. 16, № 11. – Art. 4021. – DOI: 10.3390/ma16114021.
11. Zhang J., Wang X., Zhang S., Gao Q., Li J. Effects of melamine addition stage on the performance and curing behavior of melamine-urea formaldehyde resin // BioResources. – 2013. – T. 8, № 4. – P. 5500–5514. – DOI: 10.15376/biores.8.4.5500–5514.
12. Zhang Y., Ding L., Gu J., Tan H., Zhu L. Preparation and properties of a starch-based wood adhesive with high bonding strength and water resistance // Carbohydrate Polymers. – 2015. – T. 115. – P. 32–37. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.08.063.

References

1. Kawalerczyk J., Dukarska D., Góral B., Antov P., Dziurka D., Mirski R. Modification of urea-formaldehyde resin with triethylenetetramine: Effect on adhesive properties and plywood strength // Polymers. – 2025. – Vol. 17, No. 19. – Art. 2652. – DOI: 10.3390/polym17192652.
2. Li B., Zhang J., Ren X.Y., Chang J.M., Gou J.S. Preparation and characterization of bio-oil modified urea-formaldehyde wood adhesives // BioResources. – 2014. – Vol. 9, No. 3. – P. 5125–5133. – DOI: 10.15376/biores.9.3.5125–5133.
3. Li T.H., Liang J.H., Cao M., Guo X.S., Xie X.G., Du G.B. Re-elucidation of the acid-catalyzed urea-formaldehyde reactions: A theoretical and 13C-NMR study // Journal of Applied Polymer Science. – 2016. – Vol. 133, No. 48. – Art. 44339. – DOI: 10.1002/app.44339.
4. Maulana M.I., Lubis M.A.R., Febrianto F., Hua L.S., Iswanto A.H., Antov P. et al. Environmentally friendly starch-based adhesives for bonding high-performance wood composites: A review // Forests. – 2022. – Vol. 13, No. 10. – Art. 1614. – DOI: 10.3390/f13101614.
5. Sulaiman N.S., Hashim R., Mohamad Amini M.H., Sulaiman O., Hiziroglu S. Evaluation of the properties of particleboard made using oil palm starch modified with epichlorohydrin // BioResources. – 2013. – Vol. 8, No. 1. – P. 283–301. – DOI: 10.15376/biores.8.1.283–301.
6. Sulaiman N.S., Hashim R., Sulaiman O., Nasir M., Amini M.H.M., Hiziroglu S. Partial replacement of urea-formaldehyde with modified oil palm starch based adhesive to fabricate particleboard // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2018. – Vol. 84. – P. 1–8. – DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2018.02.002.
7. Tohmura S.I., Inoue A., Sahari S.H. Influence of the melamine content in melamine-urea-formaldehyde resins on formaldehyde emission and cured resin structure // Journal of Wood Science. – 2001. – Vol. 47, No. 6. – P. 451–457. – DOI: 10.1007/BF00767897.

8. Wang H., Liang J., Zhang J., Zhou X., Du G. Performance of urea-formaldehyde adhesive with oxidized cassava starch // BioResources. – 2017. – Vol. 12, No. 4. – P. 7590–7600. – DOI: 10.15376/biores.12.4.7590–7600.
9. Yang H., Wang H., Du G., Ni K., Wu Y., Su H. et al. Ureido hyperbranched polymer modified urea-formaldehyde resin as high-performance particleboard adhesive // Materials. – 2023. – Vol. 16, No. 11. – Art. 4021. – DOI: 10.3390/ma16114021.
10. Zhang J., Wang X., Zhang S., Gao Q., Li J. Effects of melamine addition stage on the performance and curing behavior of melamine-urea formaldehyde resin // BioResources. – 2013. – Vol. 8, No. 4. – P. 5500–5514. – DOI: 10.15376/biores.8.4.5500–5514.
11. Zhang Y., Ding L., Gu J., Tan H., Zhu L. Preparation and properties of a starch-based wood adhesive with high bonding strength and water resistance // Carbohydrate Polymers. – 2015. – Vol. 115. – P. 32–37. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.08.063.
12. Zhalilov Sh.N., Rubidinov Sh.G.U. [Modification of Urea-Formaldehyde Resin with Epichlorohydrin and Polyvinyl Chloride to Improve the Properties of Wood-Based Panel Composites] // Universum: tekhnicheskie nauki. – 2026. – Vol. 4, No. 4 (145). – P. 4–10. (In Russ.).