

Леса России и хозяйство в них. 2024. № 4 (91). С. 168–177.
Forests of Russia and economy in them. 2024. № 4 (91). P. 168–177.

Научная статья
УДК 665.939.57
DOI: 10.51318/FRET.2024.91.4.018

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АЭРОИОНИЗАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ, ФОРМИРУЕМОГО КЛЕЕВОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

Кирилл Васильевич Носоновских¹, Максим Владимирович Газеев²,
Алексей Владиславович Свиридов³, Сергей Владимирович Щепочкин⁴

¹⁻⁴ Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

¹ kirya.nosonovskikh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5357-2104>

² gazeemv@usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3698-1707>

³ sviridovav@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4869-5855>

⁴ shchepochkinsv@m.usfeu.ru

Аннотация. При склеивании массивной древесины для повышения производительности и сокращения времени отверждения клеевого шва применяют различные методы интенсификации склеивания, например такие, как высокочастотный, инфракрасный, конвективный или контактный нагрев, которые являются энергозатратными. В настоящее время актуальна разработка новых энергоэффективных способов склеивания и высокопрочных клеевых композиций, обладающих минимальным временем отверждения. В работе рассматривается совершенствование технологии склеивания массивной древесины с применением аэроионизации. Аэроионизация в настоящее время получила широкое применение в медицине для очистки воздуха и обеззараживания помещений. При аэроионизации воздух насыщают отрицательными ионами кислорода, которые формируются в электрическом поле электроэфлювиального аэроионизационного устройства.

Цель работы – исследовать влияние аэроионизации на процесс склеивания массивной древесины клеевой композицией на основе эпоксидной смолы.

При проведении исследований определяли краевой угол смачиваемости поверхности древесины эпоксидной смолой, результаты определения которого подтверждают высокое адгезионное взаимодействие эпоксидной смолы и поверхности древесины. Поэтому применение данной смолы в качестве основы для клеевой композиции целесообразно. Испытания склеенных образцов на скалывание вдоль клеевого шва проводили в соответствии с ГОСТ 33120–2014. Исследования в данной области актуальны и целесообразны, а ранее проведенные эксперименты применения аэроионизации в технологии деревообработки показали положительное ее влияние на процессы отверждения пленкообразующих веществ лакокрасочных и клеевых композиций.

Ключевые слова: клееная древесина, клей, эпоксидные смолы, аэроионизация, интенсификация склеивания

Для цитирования: Исследование влияния аэроионизации на прочность клеевого соединения древесины, формируемого клеевой композицией на основе эпоксидной смолы / К. В. Носоновских, М. В. Газеев, А. В. Свиридов, С. В. Щепочкин // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 4 (91). С. 168–177.

Original article

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AEROIONIZATION ON THE STRENGTH OF THE ADHESIVE JOINT OF WOOD FORMED BY AN EPOXY RESIN-BASED ADHESIVE COMPOSITION

Kirill V. Nosonovskikh¹, Maxim V. Gazeev², Alexey V. Sviridov³, Sergey V. Shchepochkin⁴

¹⁻⁴ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

¹ kirya.nosonovskikh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5357-2104>

² gazeevmv@usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3698-1707>

³ sviridovav@m.usfeu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4869-5855>

⁴ shchepochkinsv@m.usfeu.ru

Abstract. When gluing solid wood, various methods of bonding intensification are used to increase productivity and reduce the curing time of the adhesive joint, for example, such as high-frequency, infrared, convective or contact heating, which are energy-consuming. Currently, the development of new energy-efficient bonding methods and high-strength adhesive compositions with minimal curing time is relevant. The paper considers the improvement of the technology of gluing solid wood using aeroionization. Aeroionization is currently widely used in medicine for air purification and disinfection of premises. During aeroionization, the air is saturated with negative oxygen ions of the air, which are formed in an electric field by an electroeffluviaaeroionization device.

The purpose of the work is to investigate the effect of aeroionization on the process of gluing solid wood with an epoxy resin-based adhesive composition.

During the research, the marginal wettability angle of the wood surface with epoxy resin was determined, the results of which confirm the high adhesive interaction of the epoxy resin to the wood surface. Therefore, the use of this epoxy resin as a base for an adhesive composition is advisable. Tests of glued samples for cleavage along the adhesive seam were carried out in accordance with GOST 33120–2014. Research in this area is relevant and appropriate, and previous studies of the use of aeroionization in woodworking technology have shown its positive effect on the curing processes of film-forming substances of paint and adhesive compositions.

Keywords: glued wood, glue, epoxy resins, aeroionization, intensification of gluing

For citation: Investigation of the effect of aeroionization on the strength of the adhesive joint of wood formed by an epoxy resin-based adhesive composition / K. V. Nosonovskikh, M. V. Gazeev, A. V. Sviridov, S. V. Shchepochkin // Forests of Russia and economy in them. 2024. № 4 (91). P. 168–177.

Введение

Изделия из древесины – одни из самых древних объектов, используемых человеком. Древесина нашла широкое применение в таких областях, как мебель, строительство, столярное производство, тара, спортивный инвентарь, музыкальные инструменты,

игрушки и многих других. Конструкция изделий из нее, а также общий вид и технология изготовления претерпели изменения вместе с развитием общества, отражая его уровень и стимулируя его прогресс.

Учитывая правила конструирования изделий из массивной древесины, детали из натуральной древесины следует конструировать так, чтобы неизбежные изменения их размеров и формы при колебаниях температуры и влажности были минимальными. Для этого широкие детали необходимо изготавливать не из цельной древесины, а из отдельных делянок или ламелей, склеенных по кромке или пласти, что позволяет минимизировать влажностные деформации и компенсировать внутренние напряжения в изделиях. Такие изделия прочнее, долговечнее, а также появляется возможность получения деталей больших сечений и сложных форм. Однако при всех плюсах есть у такой древесины и недостатки: ее производство усложняет технологический процесс и удорожает стоимость конечной продукции. Более того, операция склеивания является так называемым узким местом для любого технологического процесса (Волынский, 2003). Для повышения производительности и сокращения времени отверждения клеевого шва применяют различные методы интенсификации склеивания, например такие, как высокочастотный, инфракрасный, конвективный или контактный нагрев (Исаев, Еренков, 2020).

Все эти способы основаны на сообщении дополнительной энергии отверждаемому материалу, что, как правило, является энергозатратным.

Не менее важным показателем, чем время отверждения клеевого шва, является его адгезионная и когезионная прочность, которую можно оценить, применяя метод скалывания вдоль клеевого шва склеенных образцов древесины, так как от его прочности напрямую зависит долговечность всей конструкции. Повышение параметров данного показателя чаще всего достигают путем подбора клеевой композиции на более усовершенствованный, который бы отвечал целому комплексу свойств, что также связано и с химической природой адгезива, что может быть достаточно дорогостояще. Поэтому в настоящее время актуальна разработка новых энергоэффективных способов склеивания и высокопрочных клеевых композиций, обладающих минимальным временем отверждения.

На кафедре механической обработки древесины Уральского государственного лесотехниче-

ского университета (УГЛТУ) ведутся исследования в области совершенствования технологии отделки массивной древесины и ее склеивания. Был разработан состав лакокрасочной композиции на основе эпоксидной смолы с высокими показателями физико-механических, декоративных и технологических свойств (Башкирова, Газеев, 2022). На основе результатов вышеозвученных исследований было принято решение о совершенствовании технологического процесса склеивания массивной древесины с разработкой быстроотверждаемой клеевой композиции на основе эпоксидной смолы с улучшенными адгезионными и когезионными свойствами.

С целью ускорения процесса склеивания массивной древесины принято решение о применении аэроионизации, эффективность которой подтверждена для ускорения отверждения защитно-декоративного покрытия (ЗДП) также на основании пробных экспериментов, которые показали обнадеживающие результаты не только на время отверждения клеевого шва на основе поливинилацетатной (ПВА) дисперсии, но и на его адгезионные и когезионные свойства (Nosonovskikh, Gazeev, 2016).

Цель и методика исследования

Цель работы – исследовать влияния воздействия аэроионизации на процесс склеивания массивной древесины клеевой композицией на основе эпоксидной смолы.

В ходе исследований применялась клеевая композиция на основе эпоксидной смолы на основе бисфенола А с добавлением отвердителя и ускорителя аминного типа.

Для оценки адгезионного взаимодействия клеевой композиции с древесиной была исследована смачиваемость древесины эпоксидной смолой.

Краевой угол смачивания определяли расчетным путем через тангенс угла θ , который рассчитывали по формуле

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{4dh}{d^2 - 4h^2}, \quad (1)$$

где θ – краевой угол;

d – диаметр капли, мм;

h – высота капли, мм.

Для расчета массовых частей клеевой композиции и определения расхода были использованы электронные весы АСОМJW-1С. Расход клеевой композиции при нанесении на поверхность древесины составил 120–130 г/м².

Образцы для определения предела прочности клеевого соединения выпиливали из заготовок древесины бука сечением 30×30 мм и максимальной длиной 300 мм. Влажность образцов буковых ламелей определялась при помощи влагомера CONDROLHydroEasy № 14056.

Для активации клеевого состава на подложке перед склеиванием использовалось электроэффлювиальное аэроионизационное устройство (ЭЭАУ), показанное на рис. 1.

Технологический процесс склеивания ламелей массивной древесины состоит из следующих операций:

- очистка поверхности (удаление пыли, грязи и т.п.), осуществляется сухой щеткой, обдувом воздуха;
- нанесение клея на склеиваемые поверхности, осуществляется кистью;
- открытая выдержка под ионизатором;
- склеивание заготовок при помощи струбцин, давление ≈ 0,4 МПа (схема прессования заготовок приведена на рис. 2);
- технологическая выдержка;
- механическая обработка склеенных ламелей для получения образцов с размерами по ГОСТ (рис. 3).

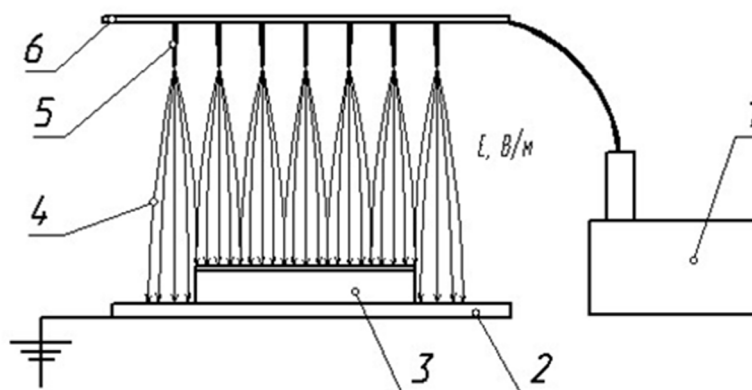


Рис. 1. Аэроионизационное электроэффлювиальное устройство:

- 1 – высоковольтный блок; 2 – основание; 3 – ламель с нанесенным слоем клея;
4 – линии силового электрического поля, формируемые электродами; 5 – электроды излучателя;
6 – электроэффлювиальный излучатель

Fig. 1. Airionization electroeffluvia setting:

- 1 – high-voltage block; 2 – base; 3 – lamella with a layer of glue applied;
4 – electric field lines formed by electrodes; 5 – emitter electrodes; 6 – electroeffluvia emitter

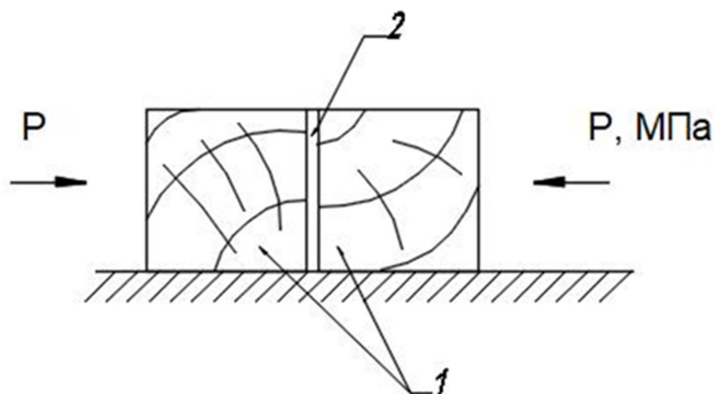


Рис. 2. Схема склеивания ламелей: 1 – буковые ламели; 2 – клеевой слой

Fig. 2. Slats gluing scheme: 1 – beechwood slats; 2 – adhesive layer

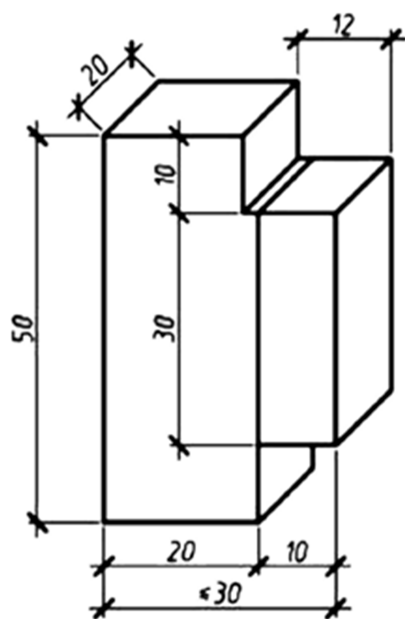


Рис. 3. Форма и размеры образца для испытаний на скалывание
Fig. 3. Shape and dimensions of the cleavage test sample



Рис. 4. Образец, закрепленный в специальном приспособлении, под нагрузкой испытательной машины
Fig. 4. The sample is fixed in a special device under the load of the test machine

Форма и размеры выпиленных образцов также соответствуют ГОСТ 33120–2014 (см. рис. 3).

Испытание склеенных образцов на прочность на скалывание вдоль клеевого шва осуществляли на испытательной машине VEB Werkstoffprüfmaschinen Leipzig в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 33120–2014 (2014). Для этого образец помещался в специальное приспособление (рис. 4).

Образец нагружают непрерывно при скорости перемещения нагружающей головки испытательной машины $0,60 \pm 0,15$ мм/мин. Испытание продолжали до разрушения образца.

В соответствии со стандартом DIN EN 204 предусматривается классификация клеевых соединений на 4 группы нагрузок по водостойкости: D1, D2, D3 и D4 (Международный стандарт..., 2016). В дальнейшем предполагается проведение испытаний разрабатываемого клеевого состава на соответствие группам нагрузки D3, D4.

Результаты и их обсуждение

При проведении исследований процесса склеивания массивной древесины клеевой композицией на основе эпоксидной смолы первоначально определили смачиваемость поверхности древесины

эпоксидной смолой, что является критерием оценки подготовки подложки и клеевой композиции для обеспечения адгезионной прочности (рис. 5).

На основании результатов смачиваемости поверхности древесины эпоксидной смолой краевой угол смачивания составил от 18 до 24° . Данный диапазон угла является острым, что позволяет утверждать о высокой адгезионной способности к поверхности древесины. Поэтому применение данной эпоксидной смолы в качестве основы для клеевой композиции целесообразно.

Для получения данных краевого угла смачивания клеевая композиция наносилась на две подложки, одна из которых была помещена в аэроионизационную установку, а вторая (контрольная) не подвергалась воздействию аэроионизации. Контроль изменения краевого угла смачивания выполнялся до практического высыхания клеевой композиции. По итогу на первом образце отверждение клеевой композиции произошло на 30 мин быстрее, чем на втором. Визуальный осмотр первого образца показал, что отвержденный клеевой слой значительно более гладкий и ровный, чем второй, что свидетельствует о лучшей смачиваемости и растекаемости при воздействии аэроионизации.

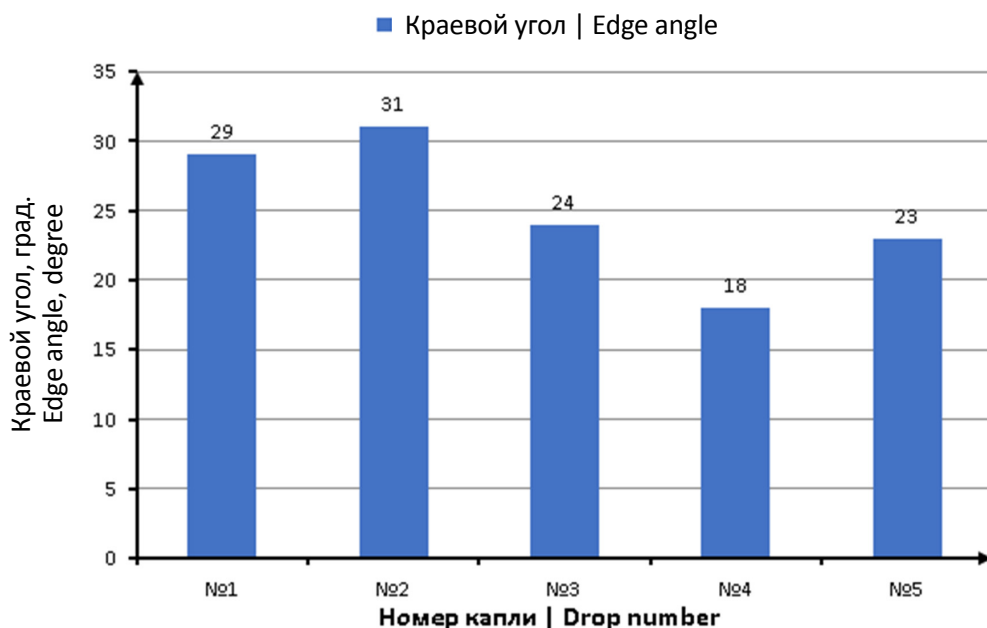


Рис. 5. Значения краевого угла смачивания эпоксидной смолы
Fig. 5. Values of the wetting edge angle of the epoxy resin

На основании приведенных выше результатов исследования краевого угла смачивания и влияния аэроионизации на клеевую композицию было принято решение о целесообразности дальнейшего проведения эксперимента по склеиванию массивной древесины и аэроионизации. Было сформировано 3 группы образцов: первая контрольная группа (К.О.) склеенных без воздействия аэроионизации; вторая группа образцов, выдержанных под воздействием отрицательных аэроионов в течение 10 мин (А10); и третья группа образцов, выдержанных под воздействием отрицательных аэроионов в течение 30 мин (А30) (рис. 6).

Расстояние от излучателя ЭЭАУ до поверхности образца принималось 0,1 м. Температура и влажность воздуха составили 19–20 °С и 65–62 % соответственно. Влажность древесины буковых ламелей $W = 7...8\%$.

Результаты испытаний на скалывание вдоль клеевого шва занесены в таблицу.

По результатам пробного эксперимента выявлена недостаточная прочность клеевого соединения, склеенного композицией на основе эпоксидной смолы. Скалывание всех образцов произошло по клеевому шву с незначительным разрушением волокон древесины (рис. 7).

В результате эксперимента получено среднее значение предела прочности в 7,87 МПа, что ниже норматива в 10 МПа (Международный стандарт..., 2016). Однако нужно учесть, что рецептура клеевой композиции не является оптимальной

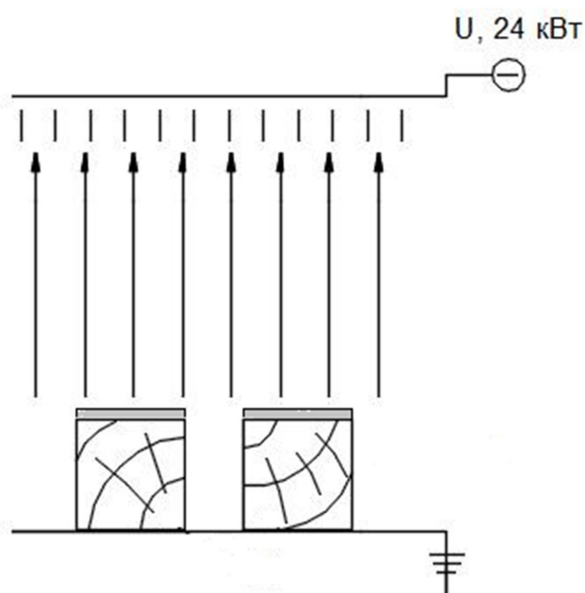


Рис. 6. Схема активации клеевой композиции воздействием аэроионизационной установки на стадии открытой выдержки
Fig. 6. The scheme of activation of the adhesive composition by the action of an aeroionization unit at the stage of open exposure

Результаты испытаний предела прочности клеевого соединения
при скалывании вдоль волокон древесины
Test report for determining the strength of the adhesive
joint when chipping along the wood fibers

Маркировка образца Marking of the sample	Размер площади скалывания образца, F The size of the chipping area of the sample, F		Разрушающая нагрузка P , Н Destructive load P , N	Предел прочности клеевого соединения σ , МПа The ultimate strength of the adhesive joint σ , MPa	Разрушение по древесине, % Destruction by wood, %
	Ширина b , мм Width b , mm	Длина l , мм Length l , mm			
1. К.О.	20	29	4900	8,4	15
2. К.О.	20	29	4240	7,31	10
3. К.О.	20	29	4180	7,2	10
4. К.О.	20	29	4950	8,53	15
Среднее значение The average value			4567,5	7,87	12,5
1. А10	20	29	2690	4,63	6
2. А10	20	29	2780	4,79	7
3. А10	20	29	3220	5,55	9
4. А10	20	29	2600	4,48	6
Среднее значение The average value			2822,5	5,88	7
1. А30	20	29	4750	8,18	16
2. А30	20	29	4800	8,27	14
3. А30	20	29	4040	6,96	10
4. А30	20	29	4070	7,02	12
Среднее значение The average value			4415	7,61	13



Рис. 7. Характер скалывания образца 2. К. О.
Fig. 7. The nature of the cleavage of the sample 2. C. S.

и необходимо провести еще ряд поисковых экспериментов для получения граничных значений количества составных частей рецептуры клеевой композиции, что позволит в дальнейшем выполнить планирование и проведение многофакторного эксперимента. Статистическая обработка результатов позволит получить математические модели и решить задачу оптимизации по поиску оптимальной рецептуры клеевой композиции на основе эпоксидной смолы и режимные параметры склеивания при воздействии аэроионизации.

Воздействие отрицательными аэроионами ускорило отверждение клеевой композиции на основе эпоксидной смолы в открытом слое, но не оказало практического влияния на прочность получаемого клеевого соединения массивной древесины.

Проведенные ранее исследования с применением клея на основе поливинилацетатной дисперсии (ПВА) с активацией отверждения аэроионизацией оказались положительными (Nosonovskikh, Gazeev, 2016). Противоположный результат в описываемом эксперименте может быть связан с различными по химической природе свойствами клеев и механизмом отверждения ПВА-дисперсий и эпоксидных смол, содержащихся в составе исследуемых клеев.

В Воронежском государственном лесотехническом университете им. Г.Ф. Морозова проводились исследования прочности склеивания массивной древесины различными клеями. Наиболее предпочтительными для склеивания заготовок из древесины по толщине и ширине оказались клеи на основе поливинилацетата, поскольку они менее токсичны и имеют предел прочности на скалывание вдоль клеевого шва, превышающий прочность самой древесины (Кантиева и др., 2020).

В сравнении с данными исследованиями предел прочности разрабатываемой клеевой композиции на основе эпоксидной смолы в 7,8 МПа является низким значением при склеивании древесины бука в соответствии с европейским стандартом. Полученный результат в очередной раз подтверждает необходимость проведения дальнейших исследований по определению оптимальной рецептуры клеевой композиции на основе эпоксидной смолы и отработке режимных параметров склеивания. Это целесообразно, так как при разработке клеевой композиции используется высокопрочная эпоксидная смола, обладающая высокими когезионными свойствами.

Исследованием влияния электромагнитного поля на смачиваемость клеевой композиции

занимался доктор технических наук Н.В. Мозговой (2012). Данные, полученные при проведении эксперимента, подтверждают его исследования. Воздействие аэроионизационной установки положительно влияет на улучшение смачиваемости и растекаемости клеевой композиции.

Выводы

Очевидно, что клеевой состав на основе эпоксидной смолы требует доработки. Необходимо дальнейшее проведение поисковых экспериментов для получения граничных значений составных частей рецептуры клеевой композиции, что позволит спланировать и провести многофакторный эксперимент для нахождения оптимального соотношения всех компонентов клеевой композиции.

Проведенные исследования показали положительное воздействие аэроионизации на процесс склеивания древесины клеевой композицией на основе эпоксидных смол (лучшая смачиваемость и растекаемость на поверхности образца для склеивания), но испытания предела прочности склеивания не выявили соответствия нормативному значению. Тем не менее исследования и эксперименты в этой области являются целесообразными. Планируется в дальнейшем рассмотреть влияние воздействия аэроионизации не только на стадии открытой выдержки образцов, но и непосредственно на стадии склеивания. Можно предположить, что это даст положительный эффект, так как известно, что воздействие электромагнитного поля аэроионизационной установки способствует уплотнению пространственной сетки адгезива клеевой композиции и укреплению межмолекулярных связей как внутри состава, так и на границе с древесиной.

Список источников

- Башкирова К. А., Газеев М. В. Поиск оптимальной рецептуры лакокрасочной композиции на основе эпоксидной смолы для формирования защитно-декоративных покрытий на изделиях из древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2022. № 2. С. 96–106.
- Вольнский В. Н. *Технология клееных материалов* : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск : Изд-во Архангельского государственного технического университета, 2003. 280 с.

- ГОСТ 33120–2014. Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений. М. : Стандартиформ, 2019. 20 с.
- Исаев С. П., Еренков О. Ю. Совершенствование технологии производства древесных клееных материалов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2020. № 2. С. 43–46. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-2-43-46
- Кантиева Е. В., Пономаренко Л. В., Послухаев М. А. Исследование прочности склеивания массивной древесины различными клеями // Актуальные направления научных исследований XXI века : теория и практика. 2020. Т. 8, № 1 (48). С. 203–206. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-203-206
- Международный стандарт DIN EN 204. Клеи неконструкционные термопластичные для дерева. Классификация. Берлин, 2016. URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6259830> (дата обращения: 03.09.2024).
- Мозговой Н. В. Прочность клеевых соединений древесины на основе электрообработанных клеев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 75. С. 484–493.
- Nosonovskikh K. V., Gazeev M. V. Improving the technology of gluing solid wood due to the impact of negative air ions. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 949.2022. 2016. DOI: 10.1088/1755-1315/949/1/012067 (дата обращения: 03.09.2024).

References

- Bashkirova K. A., Gazeev M. V. Solution of the problem of searching the optimum formula of a new paint and coating composition based on epoxy resin for the formation of protective and decorative coatings on wood // The woodworking industry. 2022. № 2. P. 96–106. (In Russ.)
- ГОСТ 33120–2014. Glued wooden structures. Methods for determining the strength of adhesive joints. Moscow : Standartinform, 2019. 20 p. (In Russ.)
- Isaev S. P., Yerenkov O. Yu. Improvement of the technology of production of wood glued materials // Repair. Recovery. Modernization. 2020. № 2. P. 43–46. DOI: 10.31044/1684-2561-2020-0-2-43-46 (In Russ.)
- Kantieva E. V., Ponomarenko L. V., Poslukhaev M. A. Investigation of the strength of gluing solid wood with various adhesives // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2020. Vol. 8, № 1 (48). P. 203–206. DOI: 10.34220/2308-8877-2020-8-1-203-206 (In Russ.)
- Mozgovoy N. V. Strength of adhesive joints of wood based on electrotreated adhesives // Polythematic network electronic scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. 2012. № 75. P. 484–493. (In Russ.)
- Nosonovskikh K. V., Gazeev M. V. Improving the technology of gluing solid wood due to the impact of negative air ions. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science 949.2022. 2016. DOI: 10.1088/1755-1315/949/1/012067 (accessed 03.09.2024).
- The international standard DIN EN 204. Classification of thermoplastic wood adhesives for non-structural applications. Berlin, 2016. URL: <https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=6259830> (accessed 03.09.2024). (In Russ.)
- Volynsky V. N. Technology of glued materials: A textbook for universities. 2nd ed., revised and expanded. Arkhangelsk : Publishing house of Arkhangelsk State Technical University, 2003. 280 p.

Информация об авторах

- К. В. Носоновских – аспирант;
М. В. Газеев – доктор технических наук, доцент;
А. В. Свиридов – кандидат технических наук, доцент;
С. В. Щепочкин – кандидат технических наук.

Information about the authors

K. V. Nosonovskikh – postgraduate student;

M. V. Gazeev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor;

A. V. Sviridov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

S. V. Shchepochkin – Candidate of Technical Sciences.

Статья поступила в редакцию 13.09.2024; принята к публикации 19.10.2024.

The article was submitted 13.09.2024; accepted for publication 19.10.2024.
