

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/14>

УДК 630*841.25



Исследование межфазного взаимодействия древесины березы с пропиточным составом

Константин В. Жужукин¹, kinkon18@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Лариса И. Бельчинская¹, belbom@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3921-8018>

Елена В. Томина^{1,2}, tomina-e-v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

Александр Н. Зяблов², alex-nz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9134-464X>

Ву Хоанг Йен³, yenvh@hufi.edu.vn, <https://orcid.org/0000-0001-7870-0232>

Алексей С. Чуйков⁴, offlex88@belstu.by, <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация

³Пищевой Промышленный Университет Хошимина, Хошимин, Вьетнам

⁴УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова 13а, г. Минск, 220006, Республика Беларусь

Целью работы явилось исследование процесса межфазного взаимодействия древесины берёзы повислой (*Betula pendula* ROTN) с матрицей разработанного пропиточного состава – отработанным моторным маслом – в трех взаимно перпендикулярных направлениях (торцовое, радиальное, тангенциальное). Определение краевого угла смачивания древесины пропиточными составами проводили на собранном нами гониометре, состоящем из камеры в USB микроскопе. Межфазное взаимодействие воды с древесиной устанавливали методом лежащей капли по значению краевого угла смачивания с использованием программы NView 10. Определена кинетика снижения величины краевого угла смачивания древесины водой в течение 90 секунд в торцовом, радиальном и тангенциальном направлениях, и водо- и биостойкости древесины. При замене водного адгезива на пропиточный состав межфазное взаимодействие усилилось, краевой угол смачивания снизился относительно дистиллированной воды от 5 до 30 раз в трех взаимно перпендикулярных направлениях и качество пропитки древесины улучшалось. Анализ динамического и статического краевых углов смачивания пропитанной отработанным моторным маслом (ОММ) древесины позволил установить значительное усиление межфазного взаимодействия функциональных групп древесины с появляющимися в отработанном моторном масле новыми, химически более активными функциональными группами, что способствует образованию гидрофобной поверхности древесины. Таким образом, величина краевого угла смачивания предоставляет информацию о качестве пропитки древесины и может использоваться как индикатор гидрофобизации древесины при обеспечении защиты от влаги и гниения.

Ключевые слова: отработанное моторное масло, древесина березы, *Betula pendula* ROTN, межфазное взаимодействие, краевой угол смачивания, вязкость

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

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


Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исследование межфазного взаимодействия древесины березы с пропиточным составом / К. В. Жужукин, Л. И. Бельчинская, Е. В. Томина, А. Н. Зяблов, В. Х. Йен, А. С. Чуйков // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 1 (49). – С. 209–221. – Библиогр.: с. 218–220 (21 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/14>.

Поступила 18.03.2023. *Пересмотрена* 14.04.2023. *Принята* 17.04.2023. *Опубликована онлайн* 15.05.2023.


Article

Investigation of interphase interaction of birch wood with impregnating composition

Konstantin V. Zhuzhukin✉¹, kinkon18@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Larisa I. Belchinskaya¹, belbom@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-3921-8018>

Elena V. Tomina^{1,2}, tomina-e-v@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

Alexander N. Zyablov², alex-nz@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-9134-464X>

Wu Hoang Yen³, yenvh@hufi.edu.vn  <https://orcid.org/0000-0001-7870-0232>

Alexey S. Chuikov⁴, offlex88@belstu.by  <https://orcid.org/0000-0002-6923-7212>

¹*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

²*Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation*

³*Food Industrial University Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam*

⁴*Belarussian State Technological University, 13a Sverdlova str., Minsk, 220006, Belarus*

Abstract

The purpose of this work was to study the properties of interfacial interaction of the basis of a new promising impregnating composition of used motor oil with birch wood in three mutually perpendicular directions (end, radial, tangential). Samples of birch wood were chosen as objects of study. The interfacial interaction was determined by the sessile drop method by the value of the contact angle, which makes it possible to establish a significant decrease in their values relative to distilled water when using an impregnating composition based on used motor oil, apparently as a result of the interfacial interaction between the wood and the hydrophobic matrix of the impregnating composition. When water molecules wet the hydrophilic surface of wood, which occurs as a result of adsorption and capillary condensation, water dipoles are attracted to the negatively charged surface of the molecular chains of cellulose, hemicelluloses and lignin due to the presence of unsaturated hydroxyl valences on their surface. An analysis of the dynamic and static contact angles of wetting wood impregnated with used engine oil made it possible to establish a significant increase in these angles compared to the data obtained for unimpregnated wood. The contact angles increase, apparently, as a result of the interfacial interaction of the functional groups of wood and the main components of the impregnating composition, leading to the formation of a hydrophobic surface. When comparing the contact angle of wetting wood with water and used engine oil, a decrease in its value was found when wetting used engine oil in comparison with water due to more intensive diffusion of used engine oil molecules into wood and the formation of intermolecular interactions of functional groups of wood and used engine oil.

Keywords: *used motor oil, birch wood, Betula pendula ROTH, interfacial interaction, contact angle, viscosity*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Zhuzhukin K.V., Belchinskaya L.I., Tomina E.V., Zyablov A.V., Wu Hoang Yen, Chuikov A.S. (2023) Investigation of interphase interaction of birch wood with impregnating composition. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 1 (49), pp. 209-221 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/14>.

Received 18.03.2023. **Revised** 14.04.2023. **Accepted** 17.04.2023. **Published online** 15.05.2023.

Введение

В России и за рубежом проводится поиск новых, эффективных и экологичных модифицирующих материалов, способных защитить древесину от внешних воздействий и придать изделиям из древесины комплекс необходимых свойств [1]. Одним из направлений расширения диапазона промышленного использования древесины является пропитка древесины стабилизирующими составами для придания ей формоустойчивости, снижения влаго- и водопоглощения, растрескивания, повышения биостойких показателей.

Гигроскопичность древесины обусловлена адсорбционной способностью молекул воды, которая складывается из сорбционных свойств высокомолекулярных компонентов древесины, вносящих определённый вклад в общее количество сорбируемой воды (по возрастанию): лигнин, гемицеллюлоза, целлюлоза. На сорбцию молекул воды влияют,

кроме химического состава, её надмолекулярная структура, ультраструктура клеточных стенок и анатомическое строение древесины. В макромолекулах высокомолекулярных компонентов находится большое количество гидроксильных групп и практически все гидроксильные группы доступны молекулам воды. Определённый вклад в гидрофильность древесины вносят карбоксильные группы. Гидрофобизация – это процесс придания материалу водоотталкивающих свойств. В случае с древесиной это обычно делается путем пропитки древесины гидрофобным средством. Это средство проникает в древесные волокна и создает барьер, который отталкивает воду, предотвращая ее впитывание в древесину. Существует несколько способов гидрофобизации древесины и придания ей водоотталкивающих свойств. Основные способы гидрофобизации древесины представлены на рис. 1.

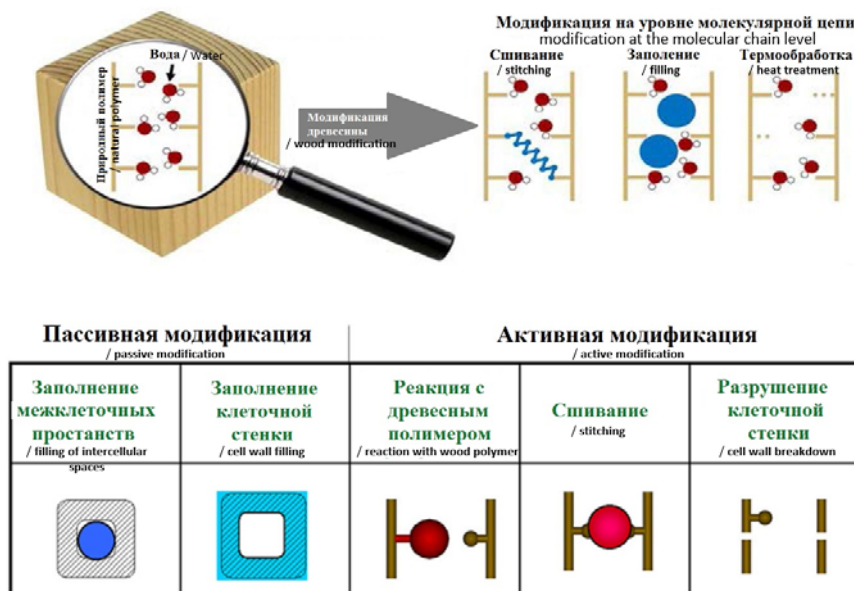


Рисунок 1. Основные способы защиты древесины от воды и влаги
Figure 1. The main ways to protect wood from water and moisture

Источник: собственные данные авторов
Source: authors' own data

Поверхностная гидрофобизация включает нанесение слоя водоотталкивающего вещества на поверхность древесины. Модификаторы могут быть изготовлены из различных материалов, таких как воск, силикон, полиуретан или эпоксидная смола. Покрытие образует на поверхности древесины защитный слой, препятствующий проникновению воды в древесину [2]. Однако этот метод менее эффективен в защите древесины от повреждения водой по сравнению с другими методами, при использовании которых древесину пропитывают водоотталкивающими средствами [3], например, химическая модификация, которая включает пропитку древесины химическими веществами, вступающими в реакцию с древесными волокнами и создающими водоотталкивающий барьер. Одним из распространенных примеров является использование алкилалкоксисиланов или димеров алкилкетенов для пропитки древесины. Химические вещества проникают в древесные волокна и вступают в реакцию с гидроксильными группами древесины, создавая водоотталкивающую поверхность [4]. Одним из распространенных химических веществ, используемых для гидрофобизации древесины, является силан. Силаны представляют собой кремнийорганические соединения, которые могут реагировать с гидроксильными группами, присутствующими в древесине, с образованием ковалентной связи. Эта связка образует защитный слой на поверхности древесины, что делает ее менее гидрофильной и более водостойкой [5]. Эффективность химической обработки для гидрофобизации древесины может зависеть от таких факторов, как тип древесины, тип используемого химиката и метод нанесения. Тем не менее, исследования показали, что химическая обработка может обеспечить надежную и длительную защиту от повреждения водой, а также улучшить размерную стабильность и долговечность древесины. Термическая обработка включает воздействие на древесину высоких температур для изменения ее физических и химических свойств. Это может включать термогидрофобную обработку, которая включает нагревание древесины в присутствии водяного пара, чтобы сделать ее гидрофобной [6, 7].

При пропитке древесины происходят межфазные взаимодействия между древесиной и пропиточной жидкостью. Эти взаимодействия могут оказать существенное влияние на успех процесса пропитки и конечные свойства древесины. На межфазное взаимодействие между древесиной и пропиточной жидкостью влияет ряд факторов, в том числе химический состав древесины, пористость древесины, химический состав пропиточной жидкости и поверхностное натяжение жидкости [8]. Когда пропиточная жидкость вступает в контакт с древесиной, она может проникнуть в древесину через естественные поры или трещины в структуре древесины. Затем пропиточная жидкость может взаимодействовать с древесиной на молекулярном уровне, что приводит к образованию химических связей или физических взаимодействий между древесиной и жидкостью. Одним из видов межфазного взаимодействия, возникающего при пропитке древесины, является адсорбция [9-12]. Адсорбция происходит, когда молекулы пропиточной жидкости прилипают к поверхности древесины, образуя тонкий слой молекул. Процесс адсорбции может происходить по нескольким механизмам, включая физическую адсорбцию, химическую адсорбцию и электростатическую адсорбцию. Физическая адсорбция связана со слабыми ван-дер-ваальсовыми силами между пропиточной жидкостью и поверхностью древесины. Химическая адсорбция, с другой стороны, включает образование химических связей между пропитывающей жидкостью и поверхностью древесины. Электростатическая адсорбция возникает при притяжении между заряженными молекулами пропиточной жидкости и заряженной поверхностью древесины [13-15].

Процесс адсорбции при пропитке древесины играет важную роль в определении проникновения и распределения пропиточной жидкости в древесине. Если пропиточная жидкость плохо адсорбируется на поверхности древесины, она может не проникнуть глубоко в древесину, и обработка пропиткой может оказаться неэффективной. И наоборот, если пропиточная жидкость сильно адсорбируется на поверхности древесины, она может не проникнуть глубоко в древесину, и обработка пропит-

кой может быть ограничена поверхностным слоем древесины.

Тип взаимодействия, возникающего при межфазном взаимодействии пропиточного состава с древесиной, зависит от химического состава пропиточного состава и поверхности древесины. Например, если пропиточная композиция представляет собой раствор на водной основе, водородные связи могут быть доминирующим взаимодействием между молекулами пропиточной композиции и поверхностью древесины. Если пропиточная композиция содержит ион металла, может возникнуть координационная связь между ионом металла и функциональными группами на поверхности древесины.

В целом при межфазном взаимодействии пропиточной композиции с древесиной могут происходить как физические, так и химические взаимодействия. Тип происходящего взаимодействия зависит от химического состава как пропиточной композиции, так и поверхности древесины, и понимание этих взаимодействий может помочь оптимизировать процесс пропитки и улучшить свойства получаемого изделия из древесины [16, 17].

Краевой угол смачивания является мерой смачиваемости поверхности и является важным параметром, который следует учитывать при пропитке древесины. При попадании капли пропиточной жидкости на поверхность древесины краевой угол представляет собой значение, образующееся между каплей и поверхностью древесины на границе трех фаз, где встречаются капля, воздух и поверхность древесины. Величина краевого угла при пропитке древесины зависит от природы пропиточной жидкости и свойств поверхности древесины. Как правило, меньший контактный угол указывает на лучшую смачиваемость и предполагает, что пропиточная жидкость глубже проникнет в древесину [18-20].

Цель данной работы – определение величины краевого угла смачивания древесины водным адгезивом и пропиточным составом, в виде отработанного моторного масла, для установления возможности межфазного взаимодействия с древесиной березы в трех взаимно перпендикулярных

направлениях (торцовое, радиальное, тангенциальное).

Материалы и методы

Для проведения экспериментов использовались образцы из древесины березы повислой (*Betula pendula* Roth), срубленной в учебно-опытном лесхозе Воронежского государственного лесотехнического университета (Воронежская область, Россия). Образцы для исследований были выпилены по всему сечению ствола на высоте от 1,3 метра, влажность образцов составляла от 8-14%. Схема отбора образцов представлена на рис. 2.

Отработанное моторное масло Lukoil 10w-40, используемое в исследовании, было слито из бензинового двигателя автомобиля Lada Granta после 10 000 километров пробега. Основные свойства используемого масла были определены и представлены в исследовании [21].

Масло сливали в одноразовую полиэтилен-терефталатовую (ПЭТ) бутылку.

Для определения краевого угла смачивания древесины пропиточными составами использовали собранный в лаборатории гониометр, состоящий из камеры в USB микроскопе, жестко закрепленном в штативе, с возможностью регулировки по высоте относительно столика для образцов. Кроме того, в устройство включено подсвечивающий диод. Общий вид установки для определения угла контакта представлен на рисунке 3.

Краевой угол смачивания древесины дистиллированной водой измеряли методом лежащей капли с использованием программы NView 10. Пропиточные жидкости наносили на образцы древесины размером 20×20×20 мм (длина, ширина, высота). Перед нанесением пропиточных жидкостей образцы подсушивали в сушильном шкафу при температуре 80 °С в течение 4 часов. Образцы из сушильного шкафа доставали последовательного с целью максимального контроля влажности испытываемых образцов. Пропиточные жидкости при нанесении имели температуру окружающей среды. Условная вязкость была определена на вискозиметре Пинкевича ВПЖ.

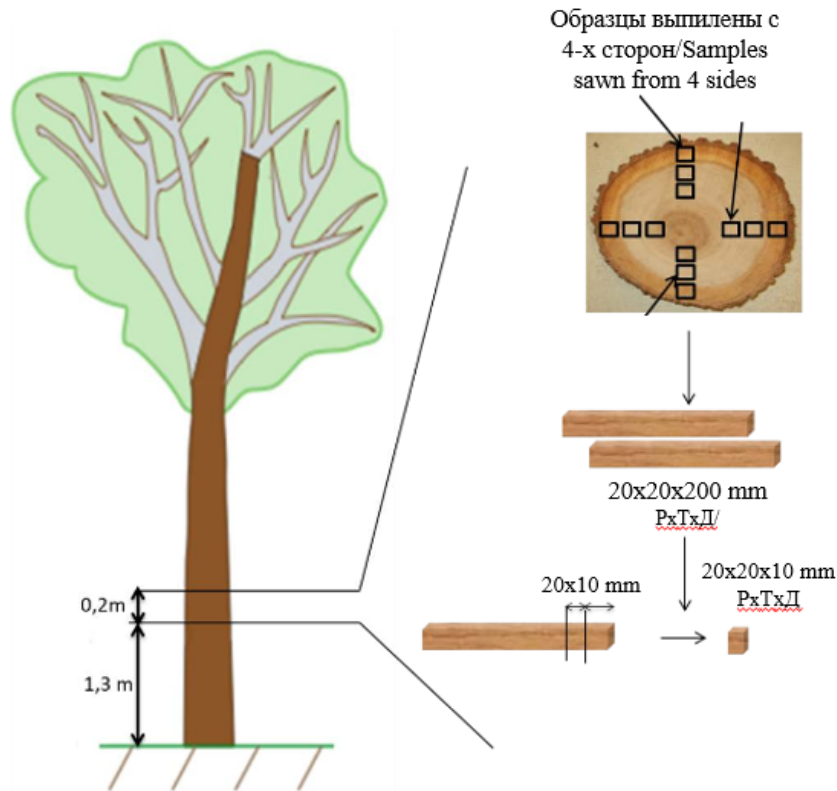


Рисунок 2. Схема выпиливания образцов из древесины для проведения испытаний

Figure 2. Diagram of sawing samples from wood for testing

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

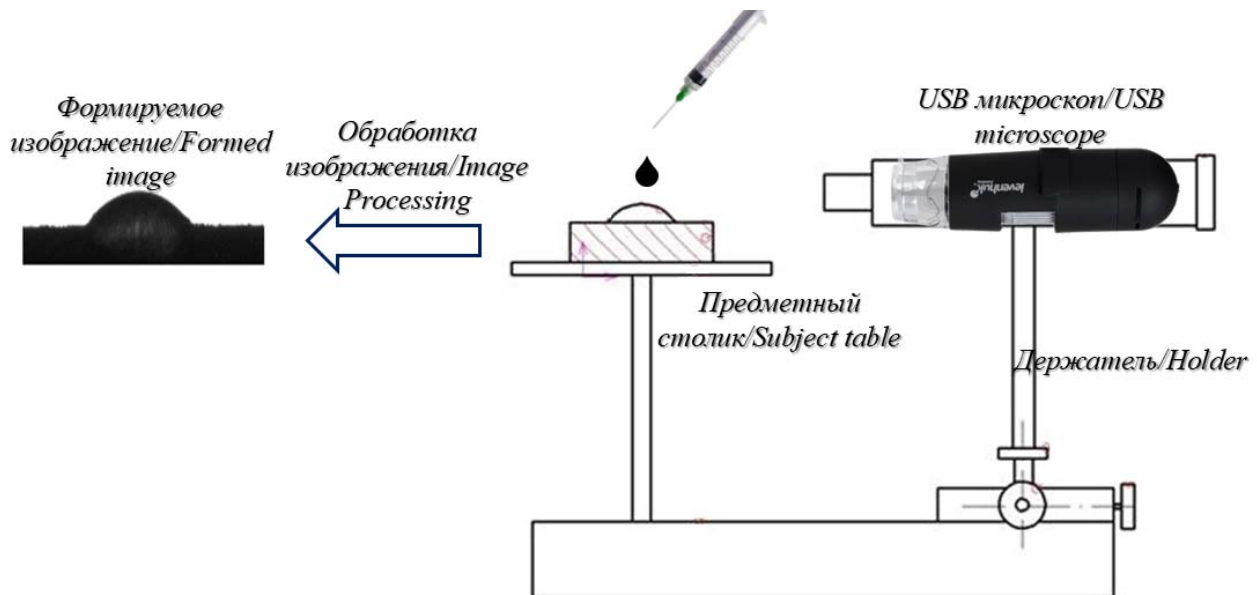


Рисунок 3. Общий вид установки для определения краевого угла смачивания методом лежащей капли

Figure 3. General view of the installation for determining the edge angle of wetting by the lying drop method

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Результаты и обсуждение

Краевой угол смачивания играет важную роль в межфазном взаимодействии при пропитке древесины. Низкий контактный угол может улучшить пропитку и глубину проникновения пропиточной жидкости, что приводит к улучшенной защите от влаги и гниения. И наоборот, большой контактный угол может уменьшить пропитку и глубину проникновения, что приведет к снижению

защиты. В связи с этим исследовались краевые углы смачивания между древесиной и отработанным моторным маслом в трех направлениях: торцовое, тангенциальное и радиальное). Полученные данные сравнивались с углом смачивания древесины дистиллированной водой также в трех направлениях.

На рис. 4 представлены результаты определения динамического краевого угла смачивания дистиллированной водой древесины березы в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

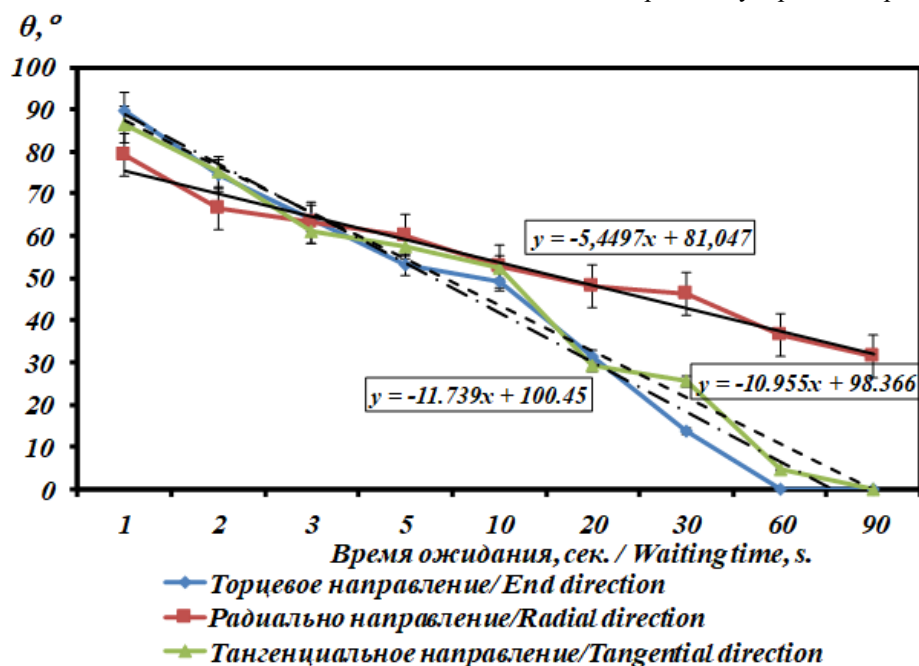


Рисунок 4. Изменение динамического краевого угла смачивания (θ) дистиллированной водой древесины берёзы в трех направлениях от времени нахождения капли на поверхности древесины (90 с)

Figure 4. Change in the dynamic edge angle of wetting (θ) with distilled water of birch wood in three directions from the time of the drop on the surface of the wood (90 seconds).

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

На рис. 5 представлены результаты определения угла контакта между древесиной березы и отработанным моторным маслом. В результате было установлено значительное снижение θ от 5 до 30 раз в процессе межфазного взаимодействия в трех взаимно перпендикулярных направлениях относительно дистиллированной воды (рис. 4, 5).

На рис. 6 представлены результаты определения условной вязкости отработанного моторного масла в диапазоне температур от 0 до 120 градусов. Полученная зависимость графически выражается гиперболой. Условная вязкость снижается с

58 до 15с при 600С и практически не меняется (на 3с) при повышении температуры до 1200С.

На рис. 7 представлены результаты сравнения динамического (а) и статического (б) краевого угла смачивания древесины березы отработанным моторным маслом и дистиллированной водой в наиболее пропитываемом торцовом направлении (рис. 4, 5).

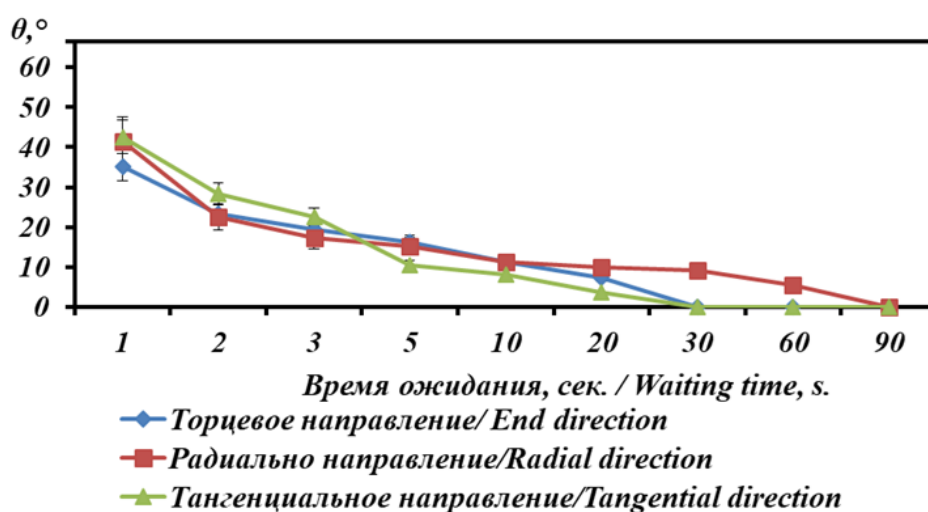


Рисунок 5. Изменение угла контакта отработанного моторного масла на древесине

Figure 5. Changing the contact angle of spent engine oil on wood

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

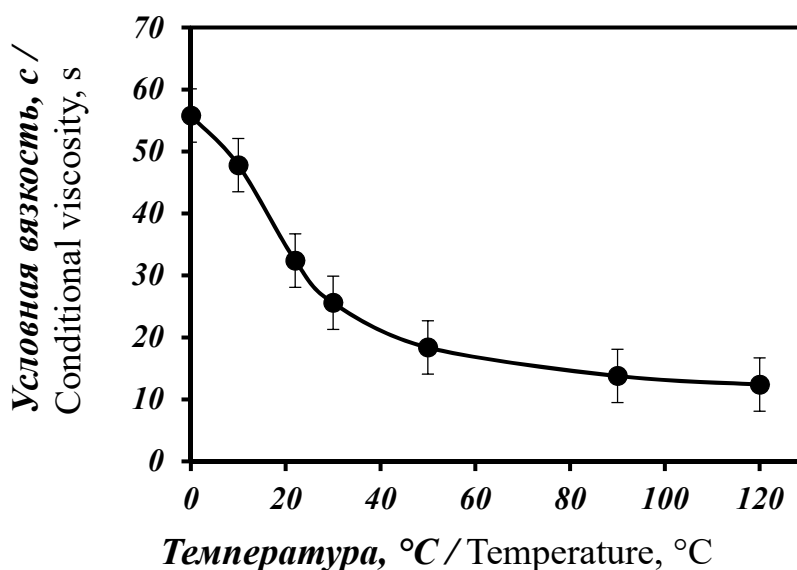


Рисунок 6. Изменение условной вязкости отработанного моторного масла при повышении температуры

Figure 6. Change in the conditional viscosity of used engine oil with increasing temperature

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Значение углов контакта в первую секунду после нанесения дистиллированной воды и отработанного моторного масла на торцовую поверхность древесины составлял $86^{\circ}44'$ и $37^{\circ}03'$ соответственно. В течение последующего времени до 30 секунд

происходит значительное снижение угла контакта для исследуемых жидкостей. Полное впитывание отработанного моторного масла происходит через 30 секунды (рис. 76) при угле контакта между поверхностью древесины и водой $25^{\circ}5'$. Максималь-

ное проникновение пропиточного состава в древесину происходит через 90 секунду, и угол контакта снижается до минимального значения (рис. 7). Исследование угла контакта в статическом режиме позволяет установить его значение через длительные промежутки времени и визуализировать изменение его значений без рассмотрения процесса в динамике, что вносит определённую ошибку при

определении этой величины. Установление динамического краевого угла смачивания позволяет количественно определить изменение угла контакта на протяжении всего процесса пропитки. Изменение угла контакта в динамике позволяет наблюдать изменение состояния системы древесина - пропиточный материал и тем самым оценить процесс межфазного взаимодействия в этой системе.

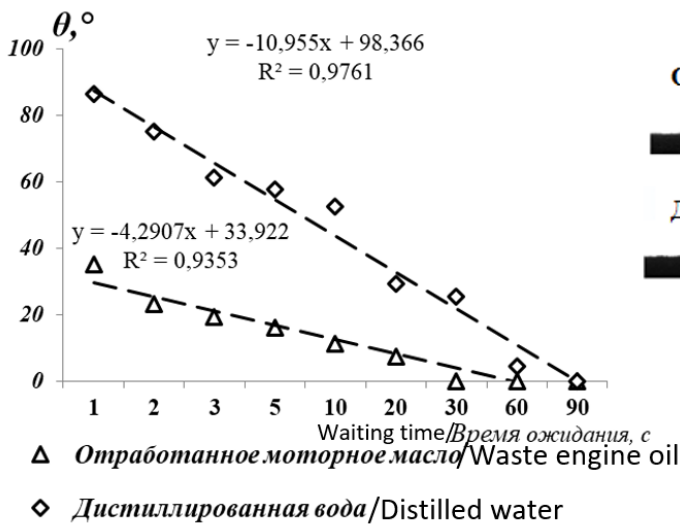


Рисунок 7. Сравнение краевого угла смачивания отработанным моторным маслом и дистиллированной водой в торцовом направлении

Figure 7. Comparison of the edge angle of wetting with spent engine oil and distilled water in the end direction

Источник: собственные данные авторов

Source: authors' own data

Значение углов контакта в первую секунду после нанесения дистиллированной воды и отработанного моторного масла на торцовую поверхность древесины составлял $86^{\circ}44'$ и $37^{\circ}03'$ соответственно. В течение последующего времени до 30 секунд происходит значительное снижение угла контакта для исследуемых жидкостей. Полное впитывание отработанного моторного масла происходит через 30 секунды (рис. 76) при угле контакта между поверхностью древесины и водой $25^{\circ}5'$. Максимальное проникновение пропиточного состава в древесину происходит через 90 секунду и угол контакта снижается до минимального значения (рис. 76). Исследование угла контакта в статическом режиме позволяет установить его значение через длительные промежутки времени и визуализировать изменение его значений без рассмотрения процесса в

динамике, что вносит определённую ошибку при определении этой величины. Установление динамического краевого угла смачивания позволяет количественно определить изменение угла контакта на протяжении всего процесса пропитки. Изменение угла контакта в динамике позволяет наблюдать изменение состояния системы древесина-пропиточный материал и тем самым оценить процесс межфазного взаимодействия в этой системе.

Закключение

На межфазное взаимодействие между поверхностью древесины и пропитывающей жидкостью влияет несколько факторов, в том числе краевой угол смачивания. Краевой угол является мерой смачиваемости поверхности древесины и может влиять на способность пропитывающей жидкости проникать в древесину. Анализ динамического и

статического краевых углов смачивания дают возможность установить значительное снижение их величин при использовании пропиточного состава на основе отработанного моторного масла, по-видимому, в результате межфазного взаимодействия между древесиной и гидрофобной матрицей пропиточного состава. Анализ динамического и статического краевых углов смачивания пропитанной ОММ древесины позволил установить значительное повышение этих углов сравнительно с данными, полученными для непропитанной древесины. Краевые углы возрастают, по-видимому, в ре-

зультате межфазного взаимодействия функциональных групп древесины и основных компонентов пропиточного состава, приводящее к образованию гидрофобной поверхности. Краевой угол смачивания может предоставить ценную информацию о качестве пропитки древесины и может использоваться в качестве показателя эффективности пропиточных жидкостей в обеспечении защиты от влаги и гниения. Меньший контактный угол обычно указывает на лучшую пропитку и улучшенную защиту, что делает его важным параметром, который следует учитывать при оценке процессов пропитки древесины.

Список литературы

1. Spear M. J. et al. Review of functional treatments for modified wood //Coatings. – 2021. – Т. 11. – №. 3. – С. 327. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11030327>
2. Song K. et al. High temperature and fire behavior of hydrothermally modified wood impregnated with carbon nanomaterials //Journal of hazardous materials. – 2020. – Т. 384. – С. 121283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121283>
3. Bayani S., Taghiyari H. R., Papadopoulos A. N. Physical and mechanical properties of thermally-modified beech wood impregnated with silver nano-suspension and their relationship with the crystallinity of cellulose //Polymers. – 2019. – Т. 11. – №. 10. – С. 1538. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101538>
4. Li P. et al. Preparation and characterization of sodium silicate impregnated Chinese fir wood with high strength, water resistance, flame retardant and smoke suppression //Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 1043-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.035>
5. Kurkowiak K., Emmerich L., Militz H. Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols—status quo and future perspectives //Wood Material Science & Engineering. – 2022. – Т. 17. – №. 6. – С. 1040-1054. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1925961>
6. Sangregorio A. et al. Humin based resin for wood modification and property improvement // Green Chemistry. – 2020. – Т. 22. – №. 9. – С. 2786-2798. DOI: [10.1039/C9GC03620B](https://doi.org/10.1039/C9GC03620B)
7. Wu S. S., Tao X., Xu W. Thermal conductivity of Poplar wood veneer impregnated with graphene/polyvinyl alcohol //Forests. – 2021. – Т. 12. – №. 6. – С. 777. <https://doi.org/10.3390/f12060777>
8. Dong Y. et al. Environmentally benign wood modifications: a review //ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2020. – Т. 8. – №. 9. – С. 3532-3540. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00427>
9. Lykidis C., Kotrotsiou K., Tsihlikis A. Reducing set-recovery of compressively densified poplar wood by impregnation–modification with melamine–formaldehyde resin //Wood Material Science & Engineering. – 2020. – Т. 15. – №. 5. – С. 269-277. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1594365>
10. Lin, W., Huang, Y., Li, J. et al. Cellulose (2018) 25: 7341. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2074-y>
11. Čermák P. et al. Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood //Holzforschung. – 2022. – Т. 76. – №. 5. – С. 437-450. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0164>
12. Biziks, V., Bicke, S., and Militz, H. (2019). Penetration depth of phenol-formaldehyde (PF) resin into beech wood studied by light microscopy. Wood Sci. Technol. 53: 165–176, <https://doi.org/10.1007/s00226-018-1058-2>.

13. Baar J. et al. Effect of hemp oil impregnation and thermal modification on European beech wood properties //European Journal of Wood and Wood Products. – 2021. – Т. 79. – №. 1. – С. 161-175. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01615-9>
14. Shen X. et al. Effect of furfurylation on hierarchical porous structure of poplar wood //Polymers. – 2020. – Т. 13. – №. 1. – С. 32. <https://doi.org/10.3390/polym13010032>
15. Li W. et al. Understanding the effect of combined thermal treatment and phenol–formaldehyde resin impregnation on the compressive stress of wood //Wood Science and Technology. – 2022. – Т. 56. – №. 4. – С. 1071-1086. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01400-2>
16. Popescu C. M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products—An overview //Fire and Materials. – 2020. – Т. 44. – №. 1. – С. 100-111. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>
17. Seng Hua Lee, Zaidon Ashaari, Wei Chen Lum, Juliana Abdul Halip, Aik Fei Ang, Li Peng Tan, Kit Ling Chin, Paridah Md Tahir, Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review, Construction and Building Materials, Volume 181, 2018, Pages 408-419, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.058>.
18. Impregnation of wood with waste engine oil to increase water-and bio-resistance / L. Belchinskaya, K. V. Zhuzhukin, T. Ishchenko, A. Platonov. Forests. 2021; 12 (12): 1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121762>.
19. Tomak E. D. Surface wettability of boron and oil-treated wood //Cerne. – 2022. – Т. 28. DOI: 10.1590/01047760202228013058
20. Повышение водостойкости древесины пропиточным составом на основе растительного масла с нанопорошком диоксида кремния / Е. В. Томина, А. И. Дмитренко, К. В. Жужукин [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12, № 2(46). – С. 68-79. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/6>.
21. Влияние ультразвукового диспергирования пропиточного состава древесины на её гидрофобизацию / Л. И. Бельчинская, К. В. Жужукин, Л. А. Новикова [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9, № 2(34). – С. 126-136. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/14>.

References

1. Spear M. J. et al. Review of functional treatments for modified wood //Coatings. – 2021. – Т. 11. – №. 3. – С. 327. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11030327>
2. Song K. et al. High temperature and fire behavior of hydrothermally modified wood impregnated with carbon nanomaterials //Journal of hazardous materials. – 2020. – Т. 384. – С. 121283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121283>
3. Bayani S., Taghiyari H. R., Papadopoulos A. N. Physical and mechanical properties of thermally-modified beech wood impregnated with silver nano-suspension and their relationship with the crystallinity of cellulose //Polymers. – 2019. – Т. 11. – №. 10. – С. 1538. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101538>
4. Li P. et al. Preparation and characterization of sodium silicate impregnated Chinese fir wood with high strength, water resistance, flame retardant and smoke suppression //Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Т. 9. – №. 1. – С. 1043-1053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.035>
5. Kurkowiak K., Emmerich L., Militz H. Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols—status quo and future perspectives //Wood Material Science & Engineering. – 2022. – Т. 17. – №. 6. – С. 1040-1054. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1925961>
6. Sangregorio A. et al. Humic based resin for wood modification and property improvement //Green Chemistry. – 2020. – Т. 22. – №. 9. – С. 2786-2798. DOI: 10.1039/C9GC03620B
7. Wu S. S., Tao X., Xu W. Thermal conductivity of Poplar wood veneer impregnated with graphene/polyvinyl alcohol //Forests. – 2021. – Т. 12. – №. 6. – С. 777. <https://doi.org/10.3390/f12060777>
8. Dong Y. et al. Environmentally benign wood modifications: a review //ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2020. – Т. 8. – №. 9. – С. 3532-3540. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.2c00427>

9. Lykidis C., Kotrotsiou K., Tsihklakis A. Reducing set-recovery of compressively densified poplar wood by impregnation–modification with melamine–formaldehyde resin //Wood Material Science & Engineering. – 2020. – Т. 15. – №. 5. – С. 269-277. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1594365>
10. Lin, W., Huang, Y., Li, J. et al. Cellulose (2018) 25: 7341. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2074-y>
11. Čermák P. et al. Wood-water interactions of thermally modified, acetylated and melamine formaldehyde resin impregnated beech wood //Holzforschung. – 2022. – Т. 76. – №. 5. – С. 437-450. <https://doi.org/10.1515/hf-2021-0164>.
12. Biziks, V., Bicke, S., and Militz, H. (2019). Penetration depth of phenol-formaldehyde (PF) resin into beech wood studied by light microscopy. Wood Sci. Technol. 53: 165–176, <https://doi.org/10.1007/s00226-018-1058-2>.
13. Baar J. et al. Effect of hemp oil impregnation and thermal modification on European beech wood properties //European Journal of Wood and Wood Products. – 2021. – Т. 79. – №. 1. – С. 161-175. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01615-9>.
14. Shen X. et al. Effect of furfurylation on hierarchical porous structure of poplar wood //Polymers. – 2020. – Т. 13. – №. 1. – С. 32. <https://doi.org/10.3390/polym13010032>.
15. Li W. et al. Understanding the effect of combined thermal treatment and phenol–formaldehyde resin impregnation on the compressive stress of wood //Wood Science and Technology. – 2022. – Т. 56. – №. 4. – С. 1071-1086. <https://doi.org/10.1007/s00226-022-01400-2>.
16. Popescu C. M., Pfriem A. Treatments and modification to improve the reaction to fire of wood and wood based products—An overview //Fire and Materials. – 2020. – Т. 44. – №. 1. – С. 100-111. <https://doi.org/10.1002/fam.2779>.
17. Seng Hua Lee, Zaidon Ashaari, Wei Chen Lum, Juliana Abdul Halip, Aik Fei Ang, Li Peng Tan, Kit Ling Chin, Paridah Md Tahir, Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review, Construction and Building Materials, Volume 181, 2018, Pages 408-419, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.058>.
18. Impregnation of wood with waste engine oil to increase water-and bio-resistance / L. Belchinskaya, K. V. Zhuzhukin, T. Ishchenko, A. Platonov. Forests. 2021; 12 (12): 1762. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121762>.
19. Tomak E. D. Surface wettability of boron and oil-treated wood //Cerne. – 2022. – Т. 28. DOI: 10.1590/01047760202228013058.
20. Povyshenie vodostojkosti drevesiny propitochnym sostavom na osnove rastitel'nogo masla s nanoporoshkom dioksida kremniya [Increasing the water resistance of wood with an impregnating composition based on vegetable oil with silicon dioxide nanopowder] / E. V. Tomina, A. I. Dmitrenkov, K. V. Zhuzhukin [etc.] // Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal]. – 2022. – V. 12, No. 2(46). – P. 68-79 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.2/6>.
21. Vliyanie ul'trazvukovogo dispergirvaniya propitochnogo sostava drevesiny` na eyo gidrofobizaciyu / L. I. Bel'chinskaya, K. V. Zhuzhukin, L. A. Novikova [etc.] // Lesotekhnicheskii zhurnal. – 2019. – V. 9, No. 2(34). – P. 126-136 (in Russian). DOI 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/14.

Сведения об авторах

Жужукин Константин Викторович – преподаватель кафедры химии, м.н.с. НИИ ИТЛК Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: kinkon18@yandex.ru.

Бельчинская Лариса Ивановна – профессор кафедры химии Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087; e-mail: chem@vglta.vrn.ru.

Томина Елена Викторовна – доктор химических наук, зав. кафедрой химии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж,

Российская Федерация, 394087; профессор ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tomina-e-v@yandex.ru.

Зяблов Александр Николаевич – доктор химических наук, профессор кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация.

Ву Хоанг Иен – аспирант кафедры аналитической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж; Преподаватель кафедры Менеджмента качества и безопасности пищевых продуктов, Пищевой Промышленный Университет Хошимина, Вьетнам

Чуйков Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Республика Беларусь, 220006, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6923-7212>, e-mail: offlex88@belstu.by.

Information about the authors

Konstantin V. Zhuzhukin – Lecturer, Department of Chemistry, Junior Researcher NII ITLC Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: kinkon18@yandex.ru.

Larisa I. Belchinskaya – DSc in Engineering, Professor, department of chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; e-mail: chem@vglta.vrn.ru.

Elena V. Tomina – Doctor of Chemical Sciences, Head. Department of Chemistry, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087; professor, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: tomina-e-v@yandex.ru.

Alexander N. Zyablov – Doctor of Chemistry, Professor of the Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Wu Hoang Yen – Postgraduate Student, Department of Analytical Chemistry, Voronezh State University, Voronezh, Voronezh; Lecturer, Department of Quality and Food Safety Management, Ho Chi Minh Food Industrial University, Vietnam

Alexey S. Chuikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belarussian State Technological University, 13a Sverdlov str., Minsk, 220006, Belarus, e-mail: offlex88@belstu.by.

✉ – Для контактов | Corresponding author