

Физико-механические характеристики композиционных материалов, получаемых из древесины березы, гидролизованной в присутствии органических кислот

Ю.Г. Скурыдин^{1а}, Е.М. Скурыдина^{2б}

¹ Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, Барнаул, Россия

² Алтайский государственный педагогический университет, ул. Молодежная, 55, Барнаул, Россия

^а skur@rambler.ru, ^б skudem@rambler.ru

^а <https://orcid.org/000-0002-1852-2152>, ^б <https://orcid.org/000-0002-1707-8846>

Статья поступила 12.02.2020, принята 21.02.2020

Исследованы физико-механические характеристики плитных композиционных материалов, полученных после обработки измельченной древесины березы методом взрывного автогидролиза в присутствии янтарной и щавелевой кислот. В их растворе осуществлялось предварительное замачивание древесной щепы перед баротермической обработкой методом взрывного автогидролиза. Композиционные материалы изготовлены из гидролизованной древесной массы горячим прессованием без добавления связующих веществ. Исследованы прочностные и гидрофобные характеристики получаемого композиционного материала. Обнаружено, что использование янтарной и щавелевой кислот на стадии взрывного автогидролиза способствует значительным изменениям в структуре древесной массы и влияет на свойства получаемых из нее композиционных материалов. Физико-механические свойства композиционного материала зависят как от вида, так и от количества используемой кислоты. Увеличение плотности по сравнению с материалом, получаемым без применения кислот, составляет не более 30 %. При этом прочностные характеристики возрастают до 80 %, а гидрофобные улучшаются до 400 %. Улучшение прочностных характеристик пропорционально увеличению содержания кислот в растворе для замачивания древесины лишь до определенной концентрации. При использовании как янтарной, так и щавелевой кислот характерно наличие точек экстремума, в которых значения прочности при изгибе композиционного материала являются максимальными. Дальнейшее увеличение количества используемого катализатора приводит к ухудшению прочностных характеристик, что является следствием доминирования деструктивных процессов над процессами межмолекулярной сшивки. Зависимости плотности композиционного материала от количества используемых при гидролизе кислот описываются экспоненциальной функцией. При использовании щавелевой кислоты наиболее интенсивное увеличение прочности и улучшение гидрофобных характеристик происходит с увеличением ее количества от 0 до 0,5 %, а при использовании янтарной кислоты — до 3 % от массы обрабатываемого древесного вещества. Обнаруженные эффекты могут быть использованы при оптимизации процессов получения композиционных материалов на основе древесины, подвергнутой баротермической обработке методом взрывного автогидролиза.

Ключевые слова: взрывной автогидролиз; древесина березы; композиционный материал; прочность; плотность; гидрофобные характеристики.

Physical and mechanical characteristics of composite materials obtained from birch wood hydrolyzed in the presence of organic acids

Yu.G. Skurydin^{1а}, E.M. Skurydina^{2б}

¹ Altai State University; 61, Lenin Pros., Barnaul, Russia

² Altai State Pedagogical University; 55, Molodezhnaya St., Barnaul, Russia

^а skur@rambler.ru, ^б skudem@rambler.ru

^а <https://orcid.org/000-0002-1852-2152>, ^б <https://orcid.org/000-0002-1707-8846>

Received 12.02.2020, accepted 21.02.2020

The physical and mechanical characteristics of plate composite materials based on hydrolyzed birch wood are investigated. The materials were obtained after processing wood by explosive autohydrolysis in the presence of succinic and oxalic acids. In a solution of these acids, wood chips were pre-soaked before barothermal treatment. Composite materials are made from hydrolyzed wood pulp without adding binders. The strength and hydrophobic characteristics of the resulting composite material are studied. It has been found that the use of succinic and oxalic acids at the stage of explosive autohydrolysis contributes to significant changes in the structure of wood mass and affects the properties of composite materials obtained from it. The physical and mechanical properties of the composite material depend both on the type and amount of acid used. The increase in density compared to the material obtained without the use of acids is up to 30%. The strength increases to 80%, and the hydrophobic properties improve to 400%. The strength improvement is proportional to the increase in the acid content in the solution to a certain concentration. When using both succinic and oxalic acids, the presence of extremum points is characteristic, in which the strength values of the composite material are the maximum. Further increase in the amount of catalyst leads to

deterioration of strength characteristics. This is a consequence of the dominance of destructive processes over intermolecular crosslinking processes. The density dependences on the amount of acids used in hydrolysis are described by an exponential function. When using oxalic acid, the most intensive increase in strength and improvement of hydrophobic characteristics occurs with an increase in its amount from 0 to 0.5%. When using succinic acid, the characteristics are improved up to 3% of the wood weight. The detected effects can be used to optimize the production of composite materials based on wood subjected to barothermic treatment by explosive autohydrolysis.

Keywords: explosive autohydrolysis; birch wood; composite material; strength; density; hydrophobic characteristics; succinic acid; oxalic acid.

Введение. Плитные композиционные материалы на основе древесины и иных компонентов растительного происхождения до настоящего времени остаются одним из наиболее востребованных видов конструктивных материалов для строительства и получения на их основе готовых изделий различного назначения [1–11]. Как правило, традиционные технологии получения материалов подобного рода предполагают использование синтетических связующих веществ, необходимых для формирования композиционной структуры с приемлемыми физико-механическими показателями. В последние годы проявляется все больший интерес к технологиям композиционных материалов на основе древесины без добавления связующих [12; 13]. Известно, что различные методы воздействия на древесину позволяют получить в ее составе компоненты, способные заменить традиционные связующие при формировании композиционных материалов [13; 14]. Следует отметить, что подобные технологии известны уже достаточно давно [15], однако несмотря на ряд достоинств, по ряду причин широкого применения они так и не нашли. Наряду с весьма жесткими и затратными режимами обработки древесины, свойства получаемых материалов зачастую оказываются недостаточно высокими и не удовлетворяют требованиям для заданных условий эксплуатации. Среди набора базовых показателей плитных композиционных материалов на основе древесины наиболее важными следует считать прочность при статическом изгибе и гидрофобные характеристики. Именно от них прежде всего и зависят границы применимости подобных материалов как в строительстве, так и в мебельном производстве.

Целью работы является изучение вариантов модификации процесса получения плитных композиционных материалов из частиц гидролизованной древесины без использования синтетических связующих веществ. В частности, изучено влияние кислых катализаторов гидролиза (янтарной и щавелевой кислот), добавляемых в древесный материал на стадии баротермической обработки, на прочностные и гидрофобные характеристики получаемого композиционного материала. Предполагается, что предобработка древесины слабыми растворами кислот будет способствовать интенсификации и углублению гидролитических превращений в исходном материале, получению на его основе композиционных материалов с более высокими характеристиками. Варьируя количеством катализатора, можно в значительной степени определять качественные показатели получаемого композиционного материала в широком диапазоне.

Экспериментальная часть. Процесс получения плитных композиционных материалов без добавления связующих является двухстадийным. Первоначально

исходный древесный материал подвергается гидролитической обработке в среде перегретого насыщенного пара высокого давления. По завершении процесса обработки паром в заданных условиях выполняется резкий сброс давления в реакторе с выбросом гидролизованной древесной массы в приемное устройство. Подобный метод обработки получил название взрывного автогидролиза, и считается одним из наиболее перспективных и эффективных методов обработки лигноцеллюлозных материалов для различных целей [16–18]. Далее осуществляется высушивание гидролизованной древесной массы до комнатно-сухого состояния, после чего она без добавления каких-либо связующих компонентов в разборной пресс-форме подвергается горячему прессованию в плитный композиционный материал.

Исходным материалом выбрана щепа березы пушистой (*Bétula pubéscens*), полученная посредством рубильной машины. Размер частиц щепы $\sim 5 \times 15 \times 25$ мм³. Перед баротермической обработкой выполнено предварительное замачивание щепы в водном растворе янтарной или щавелевой кислот. Продолжительность замачивания составляла 60 мин. Концентрация янтарной кислоты в растворах составляла 0,05..10 %, щавелевой кислоты — от 0,05 до 5 % к массе исходной воздушно-сухой щепы. Гидромодуль кислотного раствора равен 1. После замачивания щепа помещалась в реактор лабораторной установки периодического действия. В реакторе при температуре 463 К в течение 10 мин осуществлялась ее обработка в среде перегретого насыщенного водяного пара. Фактор жесткости процесса баротермической обработки, рассчитываемый по [19], составил 4 466 мин. При последующем резком сбросе давления гидролизованный материал поступает в приемное устройство. Следствием процессов, происходящих на стадии паровой обработки, является получение материала в виде увлажненной волокнистой массы бурого цвета. Изменения в древесной ткани на данной стадии обработки сопровождаются гидролизом гемицеллюлоз с образованием активных групп в аморфной составляющей получаемых компонентов [14; 20]. Гидролизованный материал становится пригоден для формирования композиционных материалов без применения связующих компонентов помимо тех, которые образуются в древесной массе при баротермической обработке.

На второй стадии высушенная до состояния комнатно-сухой влажности гидролизованная древесная масса в разборной пресс-форме подвергается горячему прессованию в плитный композиционный материал. Прессование выполняется без добавления в пресс-массу дополнительных связующих компонентов. Температура прессования всей серии образцов составляла 423 К, давление прессования 5 МПа (51 кг/см²), продолжительность ~ 1 мин/1 мм толщины плитного мате-

риала. Получению при прессовании сшитых структур, сопровождающих формирование композиционного материала, способствуют процессы поликонденсации, имеющие место между компонентами гидролизованного древесного вещества [21].

В отношении всех полученных образцов по стандартным методикам [22; 23] определены значения плотности, предела прочности при статическом изгибе, водопоглощения и разбухания за 24 ч. Кроме того, по методике [24] определено значение динамического модуля сдвига (модуля упругости) при комнатной температуре. В качестве контрольных образцов исследованы композиционные материалы, полученные в аналогичных условиях баротермической обработки без добавления кислоты на стадии предварительного замачивания щепы.

Результаты и обсуждение. Предполагается, что выбор эффективного и безопасного гидролизующего вещества, а также способа его применения позволит добиться более глубоких гидролитических превращений в древесине, получению на ее основе композиционных материалов с более высокими физико-механическими показателями. Использование катализаторов гидролиза того или иного вида может способствовать разработке гибких технологических процессов, получению материала с заданными свойствами для разных условий эксплуатации.

Применение катализаторов гидролиза способствует увеличению в реакционной среде концентрации ионов гидроксония. Скорость разрушения гликозидных связей при этом увеличивается. Результатом реакции гидролиза в такой среде становится увеличение скорости образования редуцирующих веществ в древесной массе [14; 25].

Использованные в работе катализаторы являются весьма слабыми кислотами. Они, как и прочие кислоты, ускоряют гидролитические превращения. Но, в отличие от сильных минеральных кислот, традиционно используемых в качестве гидролизующих агентов, янтарная и щавелевая кислоты не оказывают значительного деструктурирующего действия на компоненты лигноцеллюлозного комплекса ни на стадии горячего прессования композиционного материала, ни на сам материал в процессе эксплуатации изделий из него. Другими преимуществами выбранных кислот следует считать удобство их транспортировки и дозирования, нетоксичность и относительную доступность.

Анализ полученных результатов показывает, что следствием использования на стадии гидролиза даже относительно небольшого количества янтарной или щавелевой кислоты является существенное изменение физико-механических характеристик получаемого композиционного материала.

Рассмотрим некоторые из подобных изменений на конкретных примерах. На рис. 1 показана зависимость величины динамического модуля сдвига (модуля упругости) композиционного материала, измеренного при комнатной температуре, от количества щавелевой кислоты, используемой для обработки исходной древесины. Точка 1 соответствует контрольному образцу, полученному без использования кислоты, а точки 2 и 3 — образцам, полученным после обработки минимальным количеством кислоты (0,05 % к массе исход-

ной древесины). Обработка древесины с использованием вдвое большего количества катализатора приводит к резкому увеличению значения динамического модуля сдвига. Разница с контрольным образцом достигает при этом 40 %. Дальнейшее же увеличение количества катализатора приводит к устойчивому снижению данного показателя.

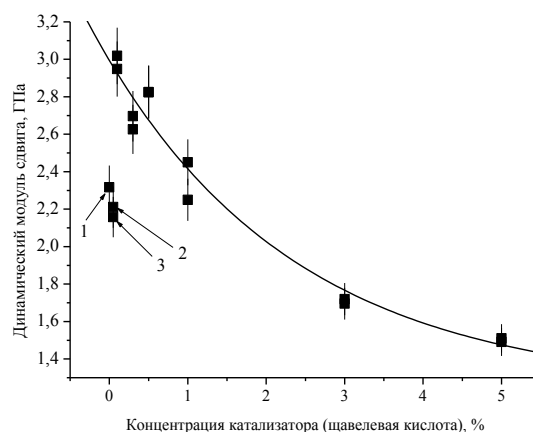


Рис. 1. Зависимость величины динамического модуля сдвига композиционного материала при комнатной температуре от содержания щавелевой кислоты

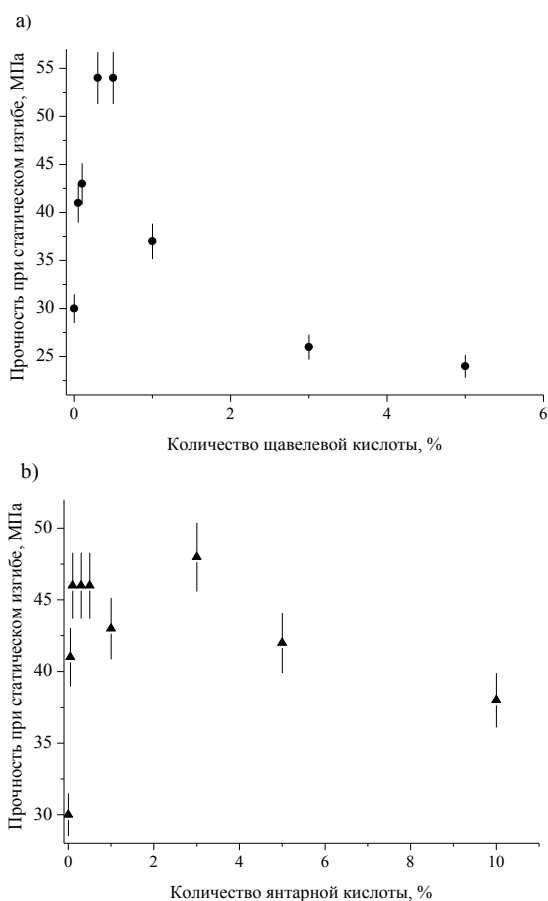


Рис. 2. Зависимость прочности при статическом изгибе композиционного материала от содержания органических кислот: а — щавелевая кислота; б — янтарная кислота

Известно, что величина динамического модуля сдвига хорошо коррелирует с жесткостью композици-

онных материалов [26]. Можно предполагать, что применительно к композиционным материалам на основе древесины значение модуля упругости характеризует долю сшитых структур в нем. Таким образом, в материале, получаемом с использованием щавелевой кислоты, максимальное количество сшивок имеет место при концентрациях катализатора в пределах 0,1..0,5 %. Косвенным подтверждением такого факта может служить зависимость от содержания щавелевой и янтарной кислот прочностных свойств материала (см. рис. 2).

Увеличение содержания щавелевой кислоты до 0,5 % и янтарной кислоты до 3 % в обоих случаях приводит к интенсивному улучшению прочностных характеристик композиционных материалов, что и наблюдается на представленных рисунках. Следствием протекания более глубоких гидролитических процессов в присутствии катализаторов является увеличение содержания активных групп в гидролизованной волокнистой массе. Получаемый из нее композиционный материал по сравнению с контрольными образцами содержит большее количество сшитых структур. Кроме того, из-за меньшего размера частиц гидролизованной древесины уменьшается свободный объем в композиционном материале и увеличивается его модуль упругости в стеклообразном состоянии при комнатной температуре.

Дальнейшее увеличение количества кислоты в выбранных условиях баротермической обработки способствует значительной интенсификации гидролитических превращений. В подобных условиях достигается максимальная степень расщепления гемицеллюлоз и деполимеризации нативного лигнина. Превышение соответственно 0,5%-ного и 3%-ного порогов содержания щавелевой и янтарной кислоты усиливает процессы деполимеризации макромолекул лигнина и образующихся фенилпропановых структур, значительно увеличивая количество низкомолекулярных компонентов. Участвуя при горячем прессовании в процессах поликонденсации, низкомолекулярные фрагменты оказывают эффект пластификации с образованием более гибких структур макромолекул. Следствием протекания таких процессов становится снижение динамического модуля сдвига и ухудшение прочностных характеристик материала в стеклообразном состоянии (см. рис. 1, 2). Характерно, что плотность материала при этом закономерно продолжает увеличиваться, а при значительных концентрациях катализатора выходит в область насыщения (рис. 3). Наблюдаемые явления можно считать следствием постепенного заполнения пустот в структуре материала за счет увеличения доли мелкодисперсных фрагментов.

Представленные зависимости прочностных характеристик композиционных материалов от количества катализаторов свидетельствуют о параллельном протекании при гидролизе и последующем горячем прессовании взаимно конкурирующих процессов сшивки и деструкции. При относительно небольших количествах катализатора доминируют процессы сшивки, а при больших — глубокой деструкции древесной ткани с разрушением целлюлозных волокон, уменьшением ко-

личества активных групп и структурной пластификации материала.

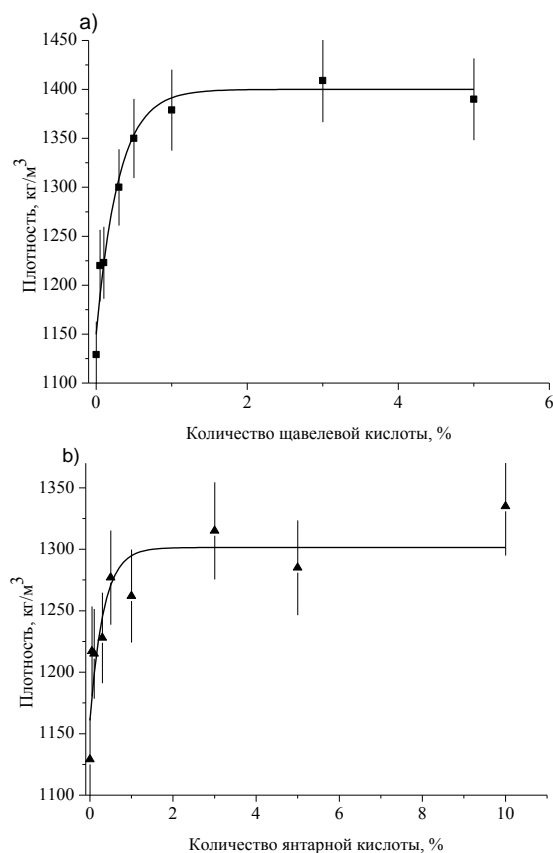


Рис. 3. Зависимость плотности композиционного материала от содержания органических кислот: *a* — щавелевая кислота; *b* — янтарная кислота

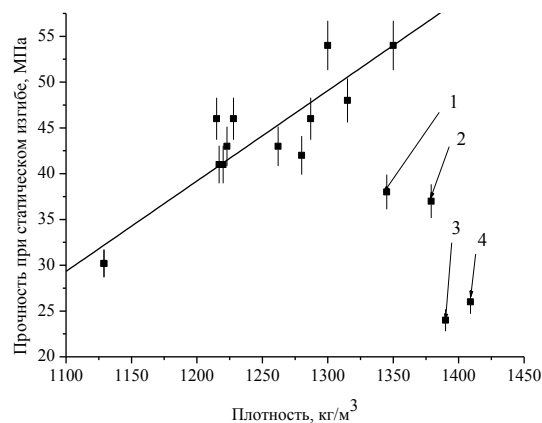


Рис. 4. Зависимость прочности на изгиб композиционного материала, полученного в присутствии щавелевой кислоты, от его плотности. Точки 1..4 соответствуют материалу, полученному при использовании 1..5 % кислоты

Зависимость степени дисперсности древесной массы, получаемой в присутствии разных количеств органических кислот, является еще одним из показателей, отражающих интенсивность протекающих гидролитических превращений. На рис. 4 показано семейство экспериментальных точек, отражающих зависимость предела прочности древесных композиционных материалов от их плотности.

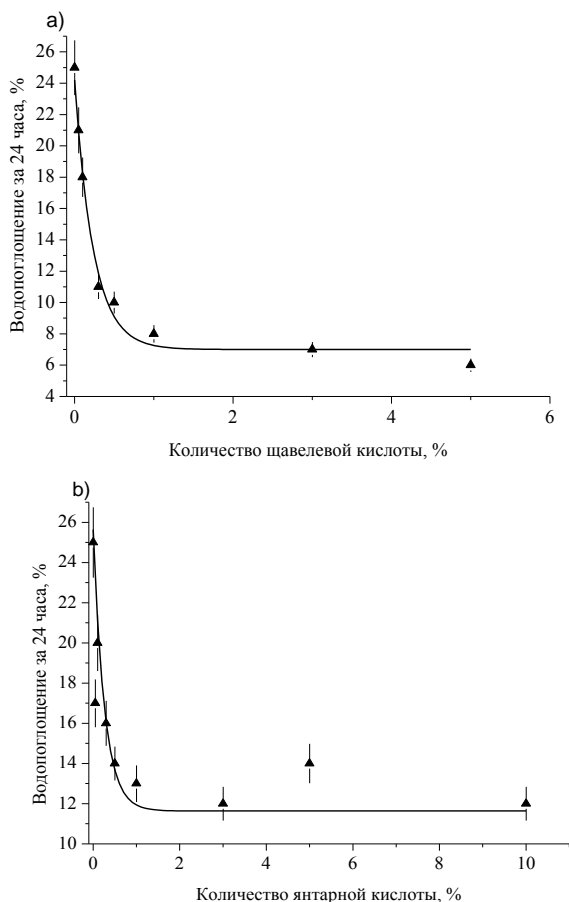


Рис. 5. Зависимость водопоглощения за 24 ч композиционного материала от содержания органических кислот: *a* — щавелевая кислота; *b* — янтарная кислота

Представленная зависимость (см. рис. 4) показывает наличие явной корреляции между прочностными показателями и плотностью. В целом подобная корреляция характерна для полимерных композиционных материалов разной природы и состава [27; 28]. При этом из серии исследованных образцов выделяется несколько таких, которые, имея высокую плотность, не обладают ожидаемо высокими прочностными показателями (точки 1..4 на рис. 4).

Наблюдаемое несоответствие может объясняться существенными различиями в фракционном и химическом составе древесной массы, получаемой в присутствии разных количеств катализаторов. Для образцов композиционных материалов, получаемых при их значительных количествах, характерно преобладание мелкодисперсной фракции. Число сохранившихся после гидролиза длинных волокон минимально, что делает невозможным полноценное армирование структуры получаемого композиционного материала за счет волокнистых морфологических структур.

Таким образом, для получения композиционных материалов с высокими прочностными показателями необходимо использовать оптимизированные объемы гидролизующих веществ, при которых в гидролизованной древесной массе гарантированно сохраняются волокнистые фрагменты, выполняющие функцию армирующего наполнителя.

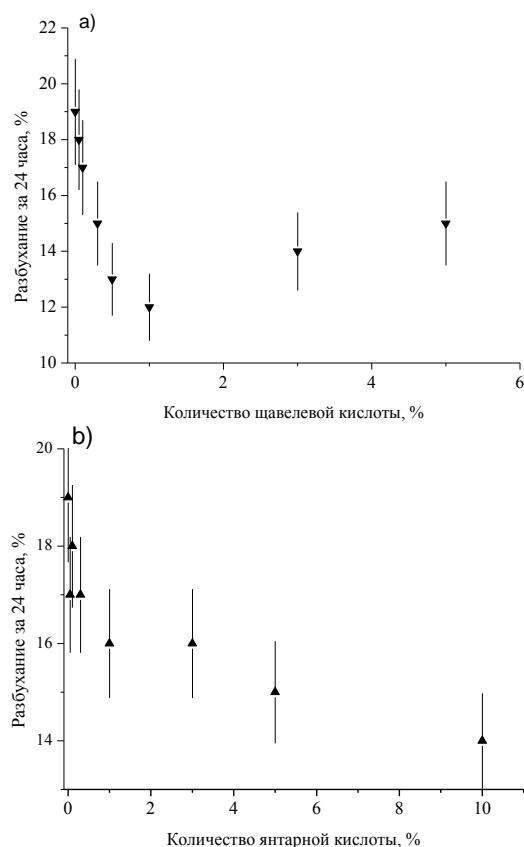


Рис. 6. Зависимость разбухания за 24 ч композиционного материала от содержания органических кислот: *a* — щавелевая кислота; *b* — янтарная кислота

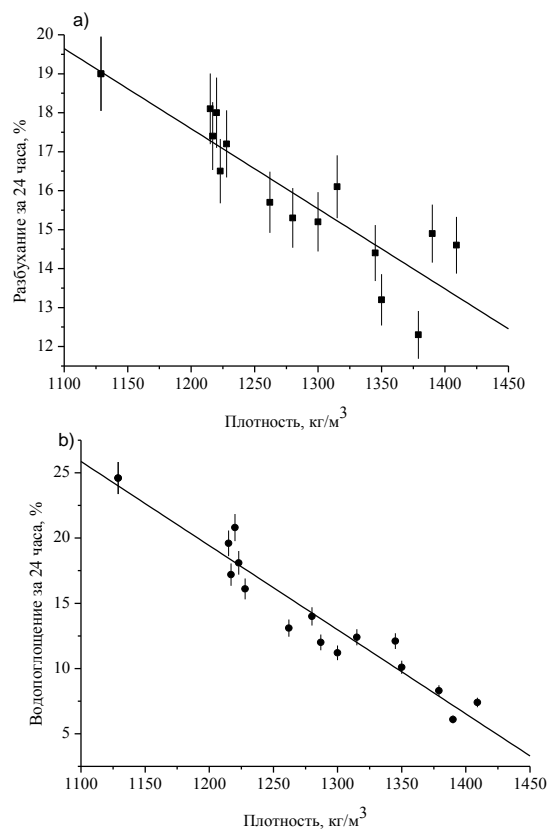


Рис. 7. Зависимость разбухания и водопоглощения за 24 ч композиционного материала от его плотности: *a* — щавелевая кислота; *b* — янтарная кислота

Большое количество сшитых межмолекулярных структур, формирующихся в поликонденсационных процессах при горячем прессовании материала, препятствует диффузии в него воды. На рис. 5, 6 показаны зависимости гидрофобных свойств композиционных материалов от количества используемых при гидролизе древесины катализаторов. Наблюдается практически линейная зависимость гидрофобных характеристик от плотности образцов (см. рис. 7). Наименьшая гидрофобность достигается уже при использовании 1 % гидролизующего вещества. Уменьшенное водопоглощение и разбухание материала из древесной массы, гидролизованной в присутствии кислот, обусловлены значительным уплотнением композиционного материала, полученного в таких условиях. При этом в поликонденсационных процессах участвует максимально возможное количество активных групп, сопровождаемое значительным уменьшением доли областей молекулярной сорбции.

Заключение. Использование янтарной и щавелевой кислот на стадии баротермической обработки древесины березы позволяет увеличить скорость и глубину гидролитических превращений в структуре древесной ткани. Результатом обработки древесины в присутствии щавелевой или янтарной кислоты, взятых соответственно в количествах до 0,5 и 3 % к массе исходной древесины, становится формирование в процессе горячего прессования гидролизованной древесной массы композиционного материала с более сшитой структу-

рой, повышенными прочностными и улучшенными гидрофобными характеристиками. Разрушение макромолекул лигнина в присутствии органических кислот способствует более выраженной фрагментации древесины, получению из нее волокнистой массы с меньшей длиной волокон. Увеличение присутствия щавелевой кислоты свыше 1 % и янтарной кислоты свыше 3 % в условиях температуры баротермической обработки 463 К при продолжительности 10 мин не приводит к дальнейшему улучшению прочностных характеристик из-за доминирования деструктивных процессов над процессами поликонденсации.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что применение на стадии баротермической обработки древесины березы небольших количеств янтарной или щавелевой кислоты влияет на характер формирования межмолекулярных структур в получаемом композиционном материале. Тем самым, введением добавок подобной природы оказывается возможное влияние на его физико-механические характеристики.

Оптимальным для получения композиционного материала с наилучшими прочностными и гидрофобными характеристиками в выбранных условиях баротермической обработки и горячего прессования следует считать использование янтарной кислоты в количестве 0,5÷3,0 %, щавелевой кислоты — 0,3÷0,5 % по отношению к массе исходной древесины.

Литература

1. Ветошкин Ю.И., Яцун И.В., Коцюба И.В. Эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе древесины: монография [Электронный ресурс] // Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 100 с. URL: <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/8007/1/Vetoshkin.pdf> – свободный (дата обращения: 20.12.2019).
2. Муллина И.В., Титунин А.А. Сырьевые и экологические аспекты производства теплоизоляционных материалов из древесных отходов // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий: материалы Всерос. науч.-практической конф. Кострома: Костром. гос. ун-т, 2019. С. 283–284.
3. Виноградов А.М., Шагалова Е.А., Воронин М.В. Строительные материалы из отходов древесины // International Scientific Review Of The Technical Sciences, Mathematics And Computer Science Collection of scientific articles VI International correspondence scientific specialized conference (Boston, USA, October 11–12, 2018). Boston, 2018. С. 21–23.
4. Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М. Способ получения изоляционных композитных плит из растительных отходов [Электронный ресурс]: пат. 2440234 Рос. Федерация. № 2010119834; заявл. 2010.05.17; опубл. 2011.11.27 // ФИПС. URL: <http://new.fipsu> (дата обращения: 23.12.2019).
5. Ashori Alireza. Hybrid thermoplastic composites using non-wood plant fibers // Hybrid Polymer Composite Materials. Properties and Characterisation. 2017. Vol. 3. P. 39–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100787-7.00002-0>
6. Ang A.F., Ashaari Z., Lee S.H., Tahir P.M., Halis R. Lignin-based copolymer adhesives for composite wood panels – A review // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2019. Vol. 95. P. 102408 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102408>
7. Vamsi Krishna Balla, Kunal H.Kate, Jagannadh Satyavolu, Paramjot Singh, Jogi Ganesh Dattatreya Tadimeti Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects // Composites Part B: Engineering 2019. Vol.174. P. 106956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>
8. Athira G., Bahurudeen A., Appari S. Sustainable alternatives to carbon intensive paddy field burning in India: A framework for cleaner production in agriculture, energy, and construction industries // J. of Cleaner Production. 2019. Vol. 236. P. 117598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.073>
9. Ederson R.Abaide, Marcus V.Tres, Giovanni L.Zabot, Marcio A.Mazutti. Reasons for processing of rice coproducts: Reality and expectations // Biomass and Bioenergy. 2019. Vol.120. P. 240–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.032>
10. Hao L.C., Sapuan S.M., Hassan M.R., Sheltami R.M. Natural fiber reinforced vinyl polymer composites // Natural Fibre Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites Development, Characterization and Applications Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering 2018. P. 27–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102160-6.00002-0>
11. A review on biopolymer production via lignin valorization // Bioresource Technology. 2019. Vol. 290. P. 121790 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121790>
12. Паскарь В.С., Рублева О.А. Направления применения экологических изделий из древесно-композиционных материалов на основе отходов деревообработки // Advanced Science. 2019. № 2 (13). С. 67–71. DOI 10.25730/VSU.0536.19.028
13. Гудков Д.Н., Дубровская О.Г., Кулагин В.А. Получение строительного теплоизоляционного материала из отходов деревообработки // International Journal of Advanced

- Studies. 2018. T. 8, № 4. С. 55-65. DOI: 10.12731/2227-930X-2018-4-55-65
14. Скурыдин Ю.Г. Стрoение и свойства композиционных материалов, полученных из отходов древесины после взрывного гидролиза: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2000. 135 с.
 15. Минин А.Н. Технология пьезотермопластиков. М.: Лесная промышленность, 1965. 296 с.
 16. Liu S.A. synergetic pretreatment technology for woody biomass conversion // Applied Energy. 2015. Vol.144. P. 114–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.021>
 17. Ewanick S.M., Bura R., Saddler J.N. Acid-catalyzed steam pretreatment of lodgepole pine and subsequent enzymatic hydrolysis and fermentation to ethanol // Bioengineering and Biotechnology. 2007. Vol. 98. P. 737–746. DOI:10.1002/bit.21436.
 18. Tillman David A. Forest products: Advanced Technologies and Economic Analyses // Academic Press: Orlando, Florida. 1985. P. 283.
 19. Overend R.P., Chornet E. Fractionation of lignocellulosies by steam aqueous pretreatments // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 1987. Vol. 321, № 1561. P. 523–536.
 20. Startsev O.V., Salin B.N., Skuridin Yu.G., Utemesov R.M., Nasonov A.D. Physical Properties and Molecular Mobility of New Wood Composite Plastic «Thermobalite» // Wood Science and Technology. 1999. Vol. 33, № 1. P.73–83.
 21. Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermal hydrolysis of wood in presence of mineral acids // Доклады Академии наук. 2000. Т. 370, № 5. С. 638–641.
 22. ГОСТ 10634-88. Плиты древесностружечные. Методы определения физических свойств. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1988. 10 с.
 23. ГОСТ 10635-88. Плиты древесностружечные. Методы определения предела прочности и модуля упругости при изгибе. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1988. 8 с.
 24. ГОСТ Р 56745-2015. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Ч. 2. Метод крутильного маятника. Национальный стандарт Российской Федерации. М.: Стандартинформ, 2015. 14 с.
 25. Салин Б.Н. Чемерис М.М., Горский Е.Ю., Калюжная Е.Н., Андреева А.В. Слоистые плитные материалы из техногенных отходов древесины и льна. 1. Условия обработки отходов и свойства плитных материалов // Изв. ВУЗов. Строительство. 1995. № 12. С. 61–64.
 26. Перепечко И.И. Введение в физику полимеров. М.: Химия, 1978. 312 с.
 27. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1973. 296 с.
 28. Гуль В.Е. Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. М.: Лабиринт, 1994. 367 с.
 - dence scientific specialized conference (Boston, USA, October 11–12, 2018). Boston, 2018. P. 21–23.
 4. Skurydin YU.G., Skurydina E.M. The method of obtaining insulating composite plates from plant waste [Elektronnyj resurs]: pat. 2440234 Ros. Federaciya. № 2010119834; zayavl. 2010.05.17; opubl. 2011.11.27. // FIPS. URL:<http://new.fipsu> (data obrashcheniya: 23.12.2019).
 5. Ashori Alireza. Hybrid thermoplastic composites using non-wood plant fibers // Hybrid Polymer Composite Materials. Properties and Characterisation. 2017. Vol. 3. P. 39-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100787-7.00002-0>
 6. Ang A.F., Ashaari Z., Lee S.H., Tahir P.M., Halis R. Lignin-based copolymer adhesives for composite wood panels – A review // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2019. Vol. 95. P. 102408 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102408>
 7. Vamsi Krishna Balla, Kunal H.Kate, Jagannadh Satyavolu, Paramjot Singh, Jogi Ganesh Dattatreya Tadimeti Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects // Composites Part B: Engineering 2019. Vol.174. P. 106956. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106956>
 8. Athira G., Bahurudeen A., Appari S. Sustainable alternatives to carbon intensive paddy field burning in India: A framework for cleaner production in agriculture, energy, and construction industries // J. of Cleaner Production. 2019. Vol. 236. P. 117598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.073>
 9. Ederson R.Abaide, Marcus V.Tres, Giovanni L.Zabot, Marcio A.Mazutti. Reasons for processing of rice coproducts: Reality and expectations // Biomass and Bioenergy. 2019. Vol.120. P. 240–256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.032>
 10. Hao L.C., Sapuan S.M., Hassan M.R., Sheltami R.M. Natural fiber reinforced vinyl polymer composites // Natural Fibre Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites Development, Characterization and Applications Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering 2018. P. 27–70 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102160-6.00002-0>
 11. A review on biopolymer production via lignin valorization // Bioresource Technology. 2019. Vol. 290. P. 121790 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121790>
 12. Paskar' V.S., Rubleva O.A. Directions for the use of environmentally friendly products from wood-composite materials based on wood processing waste // Advanced Science. 2019. № 2 (13). P. 67–71. DOI 10.25730/VSU.0536. 19.028
 13. Gudkov D.N., Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A. Obtaining building insulation material from woodworking waste // International Journal of Advanced Studies. 2018. V. 8, № 4. P. 55–65. DOI: 10.12731/2227-930X-2018-4-55-65
 14. Skurydin YU.G. The structure and properties of composite materials obtained from waste wood after explosive hydrolysis: dis. ... kand. tekhn. nauk. Barnaul, 2000. 135 p.
 15. Minin A.N. Technology of piezothermoplastics. М.: Lesnaya promyshlennost', 1965. 296 p.
 16. Liu S.A. synergetic pretreatment technology for woody biomass conversion // Applied Energy. 2015. Vol.144. P. 114–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.021>
 17. Ewanick S.M., Bura R., Saddler J.N. Acid-catalyzed steam pretreatment of lodgepole pine and subsequent enzymatic hydrolysis and fermentation to ethanol // Bioengineering and Biotechnology. 2007. Vol. 98. P. 737–746. DOI:10.1002/bit.21436.
 18. Tillman David A. Forest products: Advanced Technologies and Economic Analyses // Academic Press: Orlando, Florida. 1985. P. 283.
 19. Overend R.P., Chornet E. Fractionation of lignocellulosies by steam aqueous pretreatments // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 1987. Vol. 321, № 1561. P. 523–536.

References

1. Vetoshkin YU.I., YAcun I.V., Kocyuba I.V. Performance properties of wood-based composite materials: monografiya [Elektronnyj resurs] // Ekaterinburg: UGLTU, 2018. 100 p. URL: <http://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/8007/1/Vetoshkin.pdf> - svobodnyj (data obrashcheniya: 20.12.2019).
2. Mullina I.V., Titunin A.A. Raw and environmental aspects of the production of heat-insulating materials from wood waste // Nauchnye issledovaniya i razrabotki v oblasti dizajna i tekhnologij: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. Kostroma: Kostrom. gos. un-t, 2019. P. 283–284.
3. Vinogradov A.M., SHagalova E.A., Voronin M.V. Wood waste building materials // International Scientific Review Of The Technical Sciences, Mathematics And Computer Science Collection of scientific articles VI International correspon-

20. Startsev O.V., Salin B.N., Skuridin Yu.G., Utemesov R.M., Nasonov A.D. Physical Properties and Molecular Mobility of New Wood Composite Plastic «Thermobalite» // Wood Science and Technology. 1999. Vol. 33, № 1. P.73–83.
21. Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermal hydrolysis of wood in presence of mineral acids // Doklady Akademii nauk. 2000. V. 370, № 5. P. 638–641.
22. GOST 10634-88. Wood chipboards. Methods for determining physical properties. M.: Komitet standartizacii i metrologii SSSR, 1988. 10 p.
23. GOST 10635-88. Methods for determining tensile strength and flexural modulus. M.: Komitet standartizacii i metrologii SSSR, 1988. 8 p.
24. GOST R 56745-2015. Plastics. Determination of mechanical properties under dynamic loading. Part 2. The torsion pendulum method. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. M.: Standartinform, 2015. 14 p.
25. Salin B.N. Chemeris M.M., Gorskiy E.YU., Kalyuzhnaya E.N., Andreeva A.V. Laminated plate materials from industrial wastes of wood and flax. 1. Waste treatment conditions and properties of plate materials // News of higher educational institutions. Construction. 1995. № 12. P. 61–64.
26. Perepechko I.I. Introduction to Polymer Physics. M.: Himiya, 1978. 312 p.
27. Perepechko I.I. Acoustic methods for the study of polymers v. M.: Himiya, 1973. 296 p.
28. Gul' V.E. Kuleznev V.N. The structure and mechanical properties of polymers. M.: Labirint, 1994. 367 p.