

## К вопросу закономерностей формирования прочностных и гидрофобных характеристик композитных материалов из гидролизованной древесины

Ю.Г. Скуридин<sup>1а</sup>, Е.М. Скуридина<sup>2б</sup>

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет, Ленина, 61, Барнаул, Россия

<sup>2</sup> Алтайский государственный педагогический университет, Молодежная, 55, Барнаул, Россия

<sup>а</sup> skur@rambler.ru, <sup>б</sup>skudem@rambler.ru

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

Статья поступила 06.04.2021, принята 15.04.2021

*На основе статистических данных проанализированы закономерности формирования прочностных и гидрофобных характеристик плитных композитных материалов из гидролизованной древесины. Обработка древесины выполнена методом взрывного автогидролиза, композитные материалы получены методом горячего прессования без добавления связующих компонентов. Показаны семейства из нескольких сотен экспериментальных точек, отображающих зависимость прочности при изгибе, водопоглощения и разбухания композитного материала от его плотности для образцов, полученных из древесины березы в разных условиях ее баротермической обработки и горячего прессования. Обнаружено, что для большинства образцов наблюдается линейная зависимость прочности при изгибе от плотности материала, характерная для большинства полимерных композитных материалов независимо от их природы. При этом для ряда образцов древесных композитных материалов имеет место нарушение данной закономерности – их прочностные показатели могут быть как выше, так и ниже прогнозного значения. Высказано предположение о возможных причинах выявленных отклонений, их связи с особенностями молекулярного и морфологического строения композитного материала, режимами баротермической обработки древесины и горячего прессования. Зависимость водопоглощения и разбухания от плотности для большинства образцов композитного материала, независимо от условий получения, имеет обратно-экспоненциальный характер. С увеличением плотности наблюдается нелинейное улучшение гидрофобных свойств. При этом для ряда образцов древесных композитных материалов характерно нарушение этой закономерности – обладая невысокой плотностью (~ 700..800 кг/м<sup>3</sup>) материал характеризуется весьма высокими гидрофобными характеристиками, как правило, свойственными материалу с плотностью 1000..1100 кг/м<sup>3</sup>. Высказаны предположения, определяющие связь выявленных закономерностей с условиями получения образцов и их структурой.*

**Ключевые слова:** взрывной автогидролиз, композитный материал, прочность при статическом изгибе, водопоглощение, разбухание, статистическая закономерность.

## On the issue of regularities of formation of strength and hydrophobic characteristics of composite materials from hydrolyzed wood

Yu.G. Skuridin<sup>1а</sup>, E.M. Skuridina<sup>2б</sup>

<sup>1</sup> Altai State University; 61, Lenin Pros., Barnaul, Russia

<sup>2</sup> Altai State Pedagogical University; 55, Molodezhnaya St., Barnaul, Russia

<sup>а</sup> skur@rambler.ru, <sup>б</sup>skudem@rambler.ru

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

Received 06.04.2021, accepted 15.04.2021

*Based on statistical data, the regularities of the formation of strength and hydrophobic characteristics of plate composite materials made of hydrolyzed wood are analyzed. Wood processing is performed by the method of explosive autohydrolysis. Composite materials are made by hot pressing without the addition of binding components. Groups of several hundred experimental points are shown, which displayed the dependence of the bending strength, water absorption and swelling of the composite material on its density. All samples were obtained from birch wood under different conditions of its barothermal treatment and hot pressing. It is found that for most samples, the linear dependence of the bending strength on the material density is observed, which is characteristic for most polymer composite materials, regardless of their nature. At the same time, for some samples of wood composite materials, this pattern is violated. Their strength may be higher or lower than the predicted value. The probable causes of the identified deviations, their relationship with the features of the molecular and morphological structure of the composite material, as well as the modes of barothermal wood processing and hot pressing are described. The dependence of water absorption and swelling on density for most samples of composite material, regardless of the conditions of production, is inversely exponential. With increasing density, a nonlinear improvement in hydrophobic properties is observed. For some samples of composite materials, this pattern is violated. At a low density (~ 700..800 kg / m<sup>3</sup>) the material has high hydrophobic characteristics. As a rule, such properties occur in a material with a density of 1000..1100 kg / m<sup>3</sup>. Assumptions are made that determine the relationship of the revealed patterns with the conditions for obtaining samples and their structure.*

**Keywords:** explosive autohydrolysis, composite material, static bending strength, water absorption, swelling, statistical regularity.

**Введение.** Развитие технологий композитных материалов на основе сырья растительного происхождения в значительной степени обусловлено стремлением придать им оптимальные физико-механические характеристики для разных условий эксплуатации [1-3]. Оптимизация технологических приемов может способствовать не только получению материалов с требуемыми свойствами, но и уменьшению затрат, вовлечению в коммерческий оборот новых видов исходного сырья. Особую значимость приобретает создание композитных материалов без добавления связующих компонентов. Один из способов получения материалов подобного класса основан на использовании гидролизованного древесного вещества [1, 4-6]. При баротермической обработке древесины в составе ее компонентов образуются вещества, способные участвовать в поликонденсационных процессах с образованием полимерных связей и прочной композитной структуры [7, 8].

Применение на стадии баротермической обработки и последующего горячего прессования добавок различных химических и механических компонентов позволяет получать композитный материал в широком диапазоне спектра базовых физико-механических показателей – прежде всего прочности и гидрофобных свойств. Важным при этом становится поиск критериев, определяющих границы применимости тех или иных способов воздействия на древесину. Нахождение условий, способствующих не только получению материала с высокими физико-механическими характеристиками, но и их резкому ухудшению, может быть полезным при разработке производственных регламентов.

Характерной особенностью композитных материалов, создаваемых на основе древесины, является относительная нестабильность свойств, обусловленная существенными различиями морфологической структуры древесного вещества. Даже в пределах одной серии, когда условия обработки древесины и получения композитного материала остаются одинаковыми, для разных образцов характерны заметные отличия в показателях прочности и гидрофобных показателей. Лишь усреднение данных в пределах серии позволяет получать информацию об их точных границах. С другой стороны, для образцов, получаемых в разных условиях, может быть выделен ряд общих закономерностей, проявляющихся безотносительно использованных реагентов и выбранных технологических режимов.

Целью работы является поиск на основе статистических данных закономерностей формирования прочностных и гидрофобных характеристик композитных материалов, получаемых из гидролизованного древесного вещества. Для получения результата использованы данные, полученные для нескольких сотен образцов композитных материалов, созданных в разных условиях баротермической обработки и горячего прессования.

**Материалы и методы.** Объектом исследования являются образцы плитного композитного материала, полученного из гидролизованной древесины. В качестве исходного материала использована технологическая щепа [9] из древесины березы пушистой (*Bétula pubéscens*).

Средний размер частиц древесной щепы составлял  $\sim 5 \times 15 \times 25$  мм.

Процесс получения композитного материала осуществляется в два этапа. На первом этапе исходный материал подвергается баротермической обработке в условиях насыщенного водяного пара методом взрывного автогидролиза [6, 10-13]. Температура обработки – от 443 до 483К, продолжительность – от 300 до 600 сек. Получению ряда образцов предшествовала предгидролитическая обработка исходного материала водным раствором одного из гидролизующих веществ – пероксида водорода ( $pK_a=11,58$ ), янтарной ( $pK_a=4,21$ ) и щавелевой ( $pK_a=1,25$ ) кислот. Для этого древесный материал помещался в сосуд с раствором при комнатной температуре и подвергался периодическому перемешиванию до полного впитывания раствора обрабатываемым материалом. Масса раствора подбиралась равной массе обрабатываемой древесины. Продолжительность обработки – 1 час. Использование гидролизующего вещества позволило ускорить процесс гидролиза компонентов древесины. Тем самым оказалось возможным уменьшить жесткость условий баротермической обработки с получением материала с характеристиками, аналогичными материалу, получаемому в более жестких условиях, но без гидролизующего вещества [7, 14].

Результатом баротермической обработки древесины методом взрывного автогидролиза является получение влажной древесной массы волокнистой структуры бурого цвета, которая после сушки пригодна к получению композитного материала (рис. 1). Процессы гидролиза, происходящие при баротермической обработке древесины, приводят к появлению в ее составе реакционноспособных компонентов, выступающих в роли связующего на этапе формирования композитной структуры [6, 7].



Рис. 1. Исходная (слева) и гидролизованная (справа) древесина березы



Рис. 2. Композитный материал из гидролизованной древесины березы, полученный без добавления связующих веществ

На втором этапе высушенный гидролизованный материал подвергается горячему прессованию без добавления связующих компонентов при температуре 393..413К. Давление прессования варьировалось в пределах 0,5..7,8 МПа, продолжительность – около 1 мин./1 мм толщины. Результатом становится получение композитного материала (рис. 2), образцы которого в естественных условиях сохраняют свои форму и размеры и могут быть использованы для дальнейших исследований теми или иными методами.

Для всех образцов по стандартным методикам [15-20] определено значение плотности, прочности при статическом изгибе, водопоглощения и разбухания за 24 часа.

**Результаты и обсуждение.** Для полимерных композитных материалов характерна корреляция между плотностью, прочностными и гидрофобными характеристиками. Очевидно, что более плотная укладка компонентов увеличивает вероятность образования сшитых межмолекулярных структур и плотность пространственной сетки уменьшает количество структурных микродефектов и полостей, способных стать центрами разрушения или проникновения влаги. В полной мере подобная закономерность свойственна также древесным плитам и пластикам, получаемым на основе традиционных технологий [21]. Интерес представляет вопрос о том, насколько свойственна данная закономерность композитным материалам, получаемым на основе гидролизованной древесины.

На рис. 3 показано семейство экспериментальных точек, отражающих зависимость прочности при изгибе от плотности композитных материалов из гидролизованной древесины. Отличия состояли в использовании разных технологических режимов получения – температуры и продолжительности баротермической обработки древесины, количества и вида используемого гидролизующего вещества, температуры и давления прессования композитного материала. Для большинства образцов зависимость является линейной. Однако для ряда материалов характерна высокая плотность и относительно невысокие прочностные показатели (точки 1..29 на рисунке), не свойственные большинству прочих образцов. Вероятной причиной наблюдаемого эффекта следует считать значительные трансформации в химическом составе и морфологической структуре использованной для их получения гидролизованной древесины по сравнению с материалами, свойства которых определяются классической линейной зависимостью. В частности, образцы 7..29 были получены с применением большого количества перекиси водорода (от 13,2 до 33 м.ч./100 м.ч. древесины) в качестве гидролизующего вещества. Очевидно, что баротермическая обработка древесины, выполненная в таких условиях, сопровождается более интенсивными процессами деструкции лигнина и гемицеллюлоз. В результате происходит разделение древесных частиц на мелкодисперсные фрагменты, доля волокон в составе древесной массы становится небольшой, либо они и вовсе могут отсутствовать. Количество армирующего наполнителя, состоящего из волоконистых древесных структур и обеспечивающего прочностные свойства, становится минимальным. Кроме того, более жесткие усло-

вия гидролиза при использовании больших количеств гидролизующего вещества могут сопровождаться уменьшением доли реакционноспособных компонентов (полисахаридов) в гидролизованной древесной массе. Тем самым, в композитном материале, получаемом в таких условиях, уменьшается количество межмолекулярных связей, обеспечивающих не только прочностные, но и гидрофобные свойства материала. Подробнее об этом будет сказано ниже. Таким образом, для получения композитного материала с высокими прочностными характеристиками, необходимо использовать такое количество гидролизующего вещества, при котором в гидролизованной древесной массе сохраняется волоконистая структура, выполняющая функцию армирующего наполнителя, а гидролитические процессы не приводят к значительной деструкции полисахаридов.

Аналогичные процессы имеют место при использовании и других гидролизующих веществ. Например, при использовании щавелевой кислоты в количестве от 0,1 до 0,5 м.ч./100 м.ч. древесины прочностные характеристики материала имеют линейную зависимость от плотности. При увеличении ее количества до 1..5 м.ч. наблюдается пропорциональное увеличение плотности получаемых образцов, однако их прочность уменьшается (точки 1..6 на рис. 3).

Точки 30 и 31, расположенные в левой части рис. 3, соответствуют материалу, полученному при использовании 6,6 м.ч. перекиси водорода на 100 м.ч. древесины. Баротермическая обработка проведена при температуре 463К в течение 600 с, а прессование композитного материала выполнено в мягких условиях – при температуре 383К и давлении 0,67 МПа. Расположение этих точек может быть свидетельством присутствия повышенного количества реакционноспособных групп в композитном материале, полученном в таких условиях. Прочность материала при этом оказывается существенно выше прочностных материалов аналогичной плотности, но полученных без использования гидролизующего вещества.

Сшитые межмолекулярные структуры препятствуют диффузии воды в композитный материал. На рис. 4,5 показаны зависимости водопоглощения и разбухания за 24 часа композитного материала от его плотности. Группы экспериментальных точек принадлежат образцам, полученным в разных условиях. Точки 3,4 на рис. 4 и 5 соответствуют материалу, полученному после обработки древесины перекисью водорода, взятой в количестве 6,6 м.ч. на 100 м.ч. древесины, и отпрессованному в мягких условиях (383К; 0,67 и 2,0 МПа). При относительно низком значении плотности, обусловленном мягкими условиями прессования, образцы имеют хорошую водостойкость, выводящую показатели данных материалов за пределы общей зависимости. При этом большинство точек зависимости соответствуют образцам, полученным в более жестких условиях прессования – температуре 423К при давлении 6 МПа. Дальнейшее увеличение количества перекиси водорода до 13,2..33 м.ч. способствует получению материала с высокой плотностью и хорошими гидрофобными характеристиками (группа выделенных точек в правой части рис. 4), но невысокой прочностью (группа

точек из правой части рис. 3). На основе полученных результатов можно сделать предположение о том, что улучшение гидрофобных характеристик композитного материала, полученного из древесины, гидролизованной в присутствии 6,6 м.ч. перекиси водорода, достигается преимущественно за счет увеличения количества реакционноспособных компонентов. Их участие в поликонденсационных процессах на стадии горячего прессования способствует уменьшению числа центров молекулярной сорбции влаги в получаемом композитном материале. Использование гидролизующего вещества в больших количествах при использованных условиях баротермической обработки и прессования приводит к чрезмерным деструктивным изменениям в структуре материала, о чем свидетельствует ухудшение его прочностных характеристик.

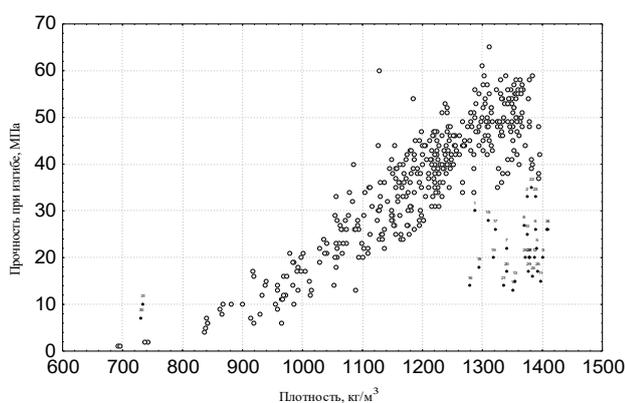


Рис. 3. Зависимость прочности при изгибе композитного материала от его плотности

Протеканию более глубоких конденсационных процессов и получению материала с улучшенными гидрофобными показателями способствует не только использование гидролизующего вещества, но и увеличение температуры прессования. Рассмотрим две пары пронумерованных точек, представленных на рис. 4 и 5. Точки 1 и 2 определяют водопоглощение и разбухание материалов, полученных при температуре прессования, соответственно, 353К и 343К (гидролизующее вещество – перекись водорода в количестве 6,6 м.ч.). Высокие показатели водопоглощения и разбухания для этих материалов лежат в пределах общей закономерности. Точки 5 и 6 определяют водопоглощение и разбухание материалов, полученных, соответственно, при температуре прессования 483К и 493К (гидролизующее вещество – перекись водорода в количестве 1,65 м.ч.). Несмотря на уменьшенное содержание гидролизующего вещества, использованного при обработке исходной древесины, для этих материалов характерно значительное снижение водопоглощения и разбухания. Эффект аналогичен тому, который был получен для образцов 3 и 4 за счет увеличения содержания гидролизующего вещества и использования пониженного давления прессования. Гидрофобные свойства этих материалов находятся за пределами зависимости, полученной для большинства прочих образцов. Таким образом, процессам водопоглощения и разбухания в композитном материале из гидролизованной древесины препятствуют межмолекулярные структуры, количество которых

определяется несколькими факторами, в том числе и температурой прессования. При получении композитного материала с приемлемыми гидрофобными характеристиками уменьшение температуры прессования, приводящее к снижению глубины конденсационных процессов, должно сопровождаться увеличением количества гидролизующего вещества, используемого в процессе предварительной обработки древесины.

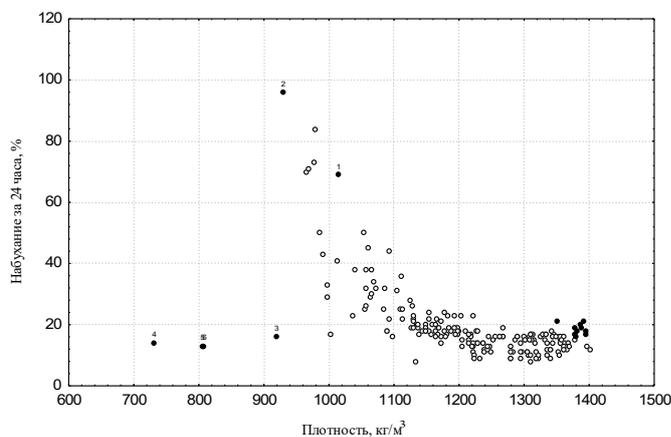


Рис. 4. Зависимость набухания за 24 часа композитного материала от его плотности

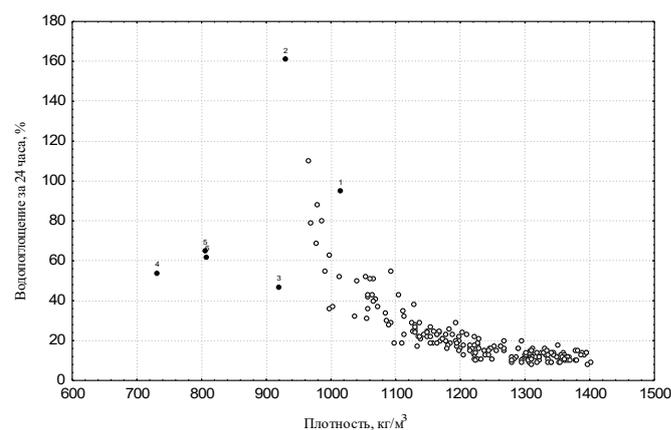


Рис. 5. Зависимость водопоглощения за 24 часа композитного материала от его плотности

### Заключение

В ходе работы исследованы статистические данные о зависимости прочностных и гидрофобных характеристик от плотности композиционных материалов, получаемых из гидролизованной древесины березы. Обнаружено, что для большинства образцов зависимость прочностных свойств носит линейный, а гидрофобных – обратно-экспоненциальный характер. Отклонения от характерных зависимостей единичны и определяются использованием особых технологических режимов. Применение перекиси водорода в качестве гидролизующего вещества в количестве свыше 13 м.ч. на 100 м.ч. древесины приводит к глубокой деструкции морфологической структуры древесины и уменьшению количества реакционноспособных компонентов. При высокой плотности прочностные свойства материала по сравнению с прочими аналогами значительно ухудшаются. Использование гидролизующего вещества в количе-

ствах, превышающих данное значение, следует считать нецелесообразным.

Значительное улучшение гидрофобных характеристик материала обеспечивается использованием умеренного количества гидролизующего вещества (для перекиси водорода – от 1,65 до 6,6 м.ч.) в сочетании с температурой прессования, превышающей 373К. Использование меньшей температуры прессования приводит к получению материала с неудовлетворительными гидрофобными характеристиками даже в условиях применения гидролизующих веществ на стадии предварительной обработки древесины из-за недостаточно глубокого протекания конденсационных процессов в таких условиях.

#### Литература

- Nasir M., Khali D.P., Jawaid M., Tahir P.M., Siakeng R., Asim M., Khan T.A. Recent development in binderless fiberboard fabrication from agricultural residues: A review. *Construction and Building Materials*. 2019. V. 211. P. 502-516.
- Alireza Ashori. 2 - Hybrid thermoplastic composites using nonwood plant fibers. *Hybrid Polymer Composite Materials. Properties and Characterisation*. 2017. P. 39-56. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100787-7.00002-0>
- Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М. Влияние параметров горячего прессования на физико-математические характеристики композиционных материалов из гидролизованной древесины лиственницы сибирской // *Хвойные борельной зоны*. 2019. Т. XXXVII. № 6. С. 465-470.
- Mason W.H. Process and apparatus for disintegration of wood and the like. US Patent 1578609 (USA). 1926.
- Focher B., Marzetti A., Beltrame P. L., Avella M. Steam exploded biomass for the preparation of conventional and advanced biopolymerbased materials *Biomass and Bioenergy*. 1998. V. 14. № 3. P. 187-194.
- Скурыдин Ю.Г. Строение и свойства композиционных материалов, полученных из отходов древесины после взрывного гидролиза: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Барнаул, 2000. 135 с.
- Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermal hydrolysis of wood in presence of mineral acids // *Докл. Академии наук*. 2000. Т. 370. № 5. С. 638-641.
- Startsev O.V., Salin B.N. The polycondensation of wood lignincarbohydrate complex components hydrolyzed by «vapor explosion» method // *Докл. Академии наук*. 2000. Т. 374. № 2. С. 217-220.
- ГОСТ 15815-83. Щеп технологическая. Технические условия (с изм. № 1, 2). М.: Изд-во стандартов, 1992. 15 с.
- Ефремов А.А., Кузнецова С.А., Баловсяк М.Т., Винк В.А., Кузнецов Б.Н. Комплексная переработка древесины методом взрывного автогидролиза // *Сиб. химический журнал*. 1992. № 6. С. 36-42.
- Liu S. A synergetic pretreatment technology for woody biomass conversion // *Applied Energy*. 2015. V.144. P. 114-128.
- 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. V. 98. P. 737-746.
- Tillman David A. Forest products: Advanced Technologies and Economic Analyses // *Academic Press: Orlando, Florida*. 1985. P. 283.
- Салин Б.Н., Чемерис М.М., Горский Е.Ю., Калужная Е.Н., Андреева А.В. Слоистые плитные материалы из техногенных отходов древесины и льна. 1. Условия обработки отходов и свойства плитных материалов // *Изв.*

Таким образом, выбор сочетания вида и количества гидролизующего вещества, а также условий прессования композитного материала позволяет оптимизировать ряд его важных физико-механических характеристик.

*Исследование выполнено в рамках реализации программы поддержки научно-педагогических работников ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», проект. «Применение методов цифровой обработки для интерпретации экспериментальных данных о структуре и свойствах древесины и древесных композитных материалов»*

- высш. учеб. заведений. Строительство. 1995. № 12. С. 61-64.
- Салин Б.Н., Скурыдин Ю.Г., Чемерис М.М., Старцев О.В., Кротов А.С., Насонов А.Д., Макарычев С.В. Исследование физико-механических свойств композиционных материалов из древесины, полученных без использования связующих веществ // *Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных сред / под. ред. О.В. Старцева, Ю.Г. Ворова. Барнаул: Изд-во АГУ, 1997. С. 47.*
- Скурыдин Ю.Г., Салин Б.Н., Старцев О.В. Композиционные плитные материалы, изготовленные из древесины без использования связующих веществ // *Композиционные материалы на основе древесины, их технология, структура, свойства и конструкции из них. М.-Мытищи: Изд-во МГУЛ, 1997. С. 38-39.*
- Скурыдин Ю.Г., Салин Б.Н., Старцев О.В. Плитные композиционные материалы из отходов с.-х. производства // *Композиты - в нар. хозяйство России. Барнаул: Изд-во АГУ, 1997. С. 49.*
- ГОСТ 10634-88. Плиты древесностружечные. Методы определения физических свойств. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР. 1988. 10 с.
- ГОСТ 10635-88. Плиты древесностружечные. Методы определения предела прочности и модуля упругости при изгибе. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР. 1988. 8 с.
- ГОСТ Р 56745-2015. Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Ч. 2. Метод крутильного маятника. Нац. стандарт Рос. Федерации. М.: Стандартинформ, 2015. 14 с.
- Грибенчикова А.В. Материаловедение в производстве древесных плит и пластиков. М.: Лесная пром-сть, 1988. 120 с.

#### References

- Nasir M., Khali D.P., Jawaid M., Tahir P.M., Siakeng R., Asim M., Khan T.A. Recent development in binderless fiberboard fabrication from agricultural residues: A review. *Construction and Building Materials*. 2019. V. 211. P. 502-516.
- Alireza Ashori. 2 - Hybrid thermoplastic composites using nonwood plant fibers. *Hybrid Polymer Composite Materials. Properties and Characterisation*. 2017. P. 39-56. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100787-7.00002-0>
- Skurydin YU.G., Skurydina E.M. Influence of the parameters of hot pressing on the physicommechanical characteristics of composite materials from hydrolyzed wood of siberian larch Conifers of the boreal area // *Conifers of the boreal area*. 2019. V. XXXVII. № 6. P. 465-470.
- Mason W.H. Process and apparatus for disintegration of wood and the like. US Patent 1578609 (USA). 1926.

5. Focher B., Marzetti A., Beltrame P. L., Avella M. Steam exploded biomass for the preparation of conventional and advanced biopolymerbased materials *Biomass and Bioenergy*. 1998. V. 14. № 3. P. 187-194.
6. Skurydin YU.G. The structure and properties of composite materials obtained from waste wood after explosive hydrolysis: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.05. Barnaul, 2000. 135 p.
7. Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermal hydrolysis of wood in presence of mineral acids // *Dokl. Akademii nauk*. 2000. V. 370. № 5. P. 638-641.
8. Startsev O.V., Salin B.N. The polycondensation of wood lignin-carbohydrate complex components hydrolyzed by «vapor explosion» method // *Dokl. Akademii nauk*. 2000. V. 374. № 2. P. 217-220.
9. GOST 15815-83. Technological chips. Specifications. M.: Izd-vo standartov, 1992. 15 p.
10. Efremov A.A., Kuznecova S.A., Balovsyak M.T., Vink V.A., Kuznecov B.N. Complex wood processing by explosive auto-hydrolysis // *Sib. himicheskij zhurnal*. 1992. № 6. P. 36-42.
11. Liu S. A synergetic pretreatment technology for woody biomass conversion // *Applied Energy*. 2015. V.144. P. 114-128.
12. 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. V. 98. P. 737-746.
13. Tillman David A. Forest products: Advanced Technologies and Economic Analyses // Academic Press: Orlando, Florida. 1985. P. 283.
14. Salin B.N., CHemeris M.M., Gorskij 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.
15. Salin B.N., Skurydin YU.G., CHemeris M.M., Starcev O.V., Krotov A.S., Nasonov A.D., Makarychev S.V. Investigation of the physical and mechanical properties of composite materials made of wood obtained without the use of binders // *Ekspерimental'nye metody v fizike strukturno-neodnorodnyh sred / pod. red. O.V. Starceva, YU.G. Vorova*. Barnaul: Izd-vo AGU, 1997. P. 47.
16. Skurydin YU.G., Salin B.N., Starcev O.V. Composite plate materials made from wood without the use of binders // *Kompozicionnye materialy na osnove drevesiny, ih tekhnologiya, struktura, svojstva i konstrukcii iz nih*. M.-Mytishchi: Izd-vo MGUL, 1997. P. 38-39.
17. Skurydin YU.G., Salin B.N., Starcev O.V. Plate composite materials from agricultural waste // *Kompozity - v nar. hozyajstvo Rossii*. Barnaul: Izd-vo AGTU, 1997. P. 49.
18. GOST 10634-88. Wood chipboards. Methods for determining physical properties. M.: Komitet standartizacii i metrologii SSSR. 1988. 10 p.
19. GOST 10635-88. Wood chipboards. Methods for determining tensile strength and flexural modulus. M.: Komitet standartizacii i metrologii SSSR. 1988. 8 p.
20. 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.
21. Gribenchikova A.V. Materials science in the production of wood boards and plastics. M.: Lesnaya prom-st', 1988. 120 p.