

УДК 674.046

ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВНОГО АВТОГИДРОЛИЗА НА ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРЕВЕСИНЫ ДУБА *QUERCUS ROBUR*

© Ю.Г. Скурыдин¹, Е.М. Скурыдина², В.В. Коньшин^{3*}, А.Н. Афаньков³, Юку Ногба Жан³, А.А. Беушев³

¹Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, Барнаул, 656049 (Россия), e-mail: skur@rambler.ru

²Алтайский государственный педагогический университет, ул. Молодежная, 55, Барнаул, 656031 (Россия), e-mail: skudem@mail.ru

³Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, пр. Ленина, 46, Барнаул, 656038 (Россия), e-mail: vadandral@mail.ru

Методом динамического механического анализа получены температурные зависимости динамического модуля сдвига и модуля потерь древесины дуба *Quercus Robur* L., подвергнутой предобработке методом взрывного автогидролиза. Показано, что следствием увеличения степени жесткости гидролиза является уменьшение температуры стеклования комплекса аморфных компонентов древесины. Наибольшее снижение температуры стеклования в сравнении с исходной древесиной, установленное по положениям минимума температурной производной динамического модуля сдвига и пика на температурной зависимости динамического модуля потерь, составляет 75 и 45 °С соответственно. С увеличением жесткости условий баротермической обработки наблюдается тенденция уменьшения значения динамического модуля сдвига при комнатной температуре. Обнаружено, что температуры положения максимумов на температурных зависимостях динамического модуля потерь не соответствуют температурам минимумов на температурной производной, и с возрастанием степени жесткости гидролиза данное расхождение значительно усиливается. Высказаны предположения о природе процессов, происходящих в древесной ткани, и вызывающих данные эффекты. В частности, наиболее вероятно, что уменьшение температуры стеклования аморфной компоненты в образцах гидролизованного древесного вещества по сравнению с исходной древесиной является следствием увеличения гибкости молекулярных цепей лигноуглеводного комплекса. Редуцирующие вещества и фрагменты низкомолекулярного лигнина, образующиеся при гидролизе, выполняют роль пластификатора и облегчают подвижность кинетических компонентов древесного вещества.

Ключевые слова: динамический модуль сдвига, динамический модуль потерь, древесина, гидролиз, взрывной автогидролиз, температура стеклования, фактор жесткости.

Введение

Древесина – сложный комплекс высокомолекулярных соединений, представляющий интерес как исходный материал для получения разнообразных изделий, продуктов и веществ [1]. Для обоснования технологических режимов обработки, используемых при их создании, придания получаемым материалам требуемых показателей, возникает необходимость в изучении закономерностей процессов, происходящих в древесной

Скурыдин Юрий Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: skur@rambler.ru
Скурыдина Елена Михайловна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: skudem@mail.ru
Коньшин Вадим Владимирович – доктор химических наук, доцент, e-mail: vadandral@mail.ru
Афаньков Антон Николаевич – аспирант, e-mail: antonafankov@yandex.ru
Юку Ногба Жан – аспирант, e-mail: bertrand86@mail.ru
Беушев Александр Анатольевич – директор института, кандидат химических наук, e-mail: baa7@list.ru

ткани при воздействии на нее разнообразных сред, в том числе при высокотемпературной обработке в присутствии воды. Примером подобного воздействия может служить взрывной автогидролиз [2–4]. Модификация структуры растительной ткани под действием высокой температуры в присутствии воды приводит к радикальным изменениям в ее молекулярном и морфологическом строении. Имеют место процессы деполимеризации нативного лигнина и ге-

* Автор, с которым следует вести переписку.

мицеллюлоз, образование низкомолекулярных водорастворимых компонентов и многочисленных производных этих компонентов [5]. Глубина изменений, происходящих в химическом составе материала и его морфологической структуре, в значительной степени зависят от режимов обработки – температуры, продолжительности, количества воды, наличия и концентрации катализатора и т.п. Любые преобразования в структуре неизбежно находят отражение в виде измененных физико-механических характеристик, которые могут быть обнаружены различными физическими методами. Их использование, направленное на обоснование выбора режимов обработки древесины, может предложить те или иные технологии, позволяющие придать материалу заданные свойства, а также состав для получения различных продуктов и веществ на основе древесины. При этом изучение изменений, происходящих в древесной ткани в процессе ее обработки паром высокого давления, требует выбора таких методов исследований, которые позволяют наилучшим образом выявить закономерности протекающих процессов.

Одним из эффективных методов анализа структуры древесной ткани, а также изменений, происходящих в ней при механохимической обработке, причем в широком диапазоне температур, является динамический механический анализ (ДМА), хорошо зарекомендовавший себя при проведении ряда экспериментов [6–9]. Методом динамической механической спектроскопии в диапазоне положительных температур в древесине разных пород ранее был выявлен ряд характерных зон температурных переходов, определяющихся резким уменьшением величины динамического модуля сдвига по абсолютному значению. Соответствующие процессы были зафиксированы в интервалах температур 50–70, 170–220 и 255–280 °С. При этом интерпретация полученных результатов является весьма непростой задачей, так как ее решение обусловлено особенностями многокомпонентной структуры древесного вещества и недостаточной изученностью материалов подобного рода с привлечением иных высокочувствительных динамических методов исследования. В работе [8] было высказано предположение, что температурный переход в диапазоне от комнатной температуры до 70 °С является многокомпонентным. В целом, он представляет собой результат наложения процессов размораживания локальных подвижностей макроцепей молекул целлюлозы, стеклования ее аморфной составляющей, а также лигнина и гемицеллюлоз, пластифицированных водой, всегда присутствующей в древесине в том или ином количестве. Следующий, наиболее выраженный и обнаруживаемый во всех исследованных древесных породах переход при температуре 190–220 °С объясняется процессом стеклования компонентов лигноуглеводного комплекса, а переход в интервале температур 250–280 °С соответствует области плавления кристаллитов целлюлозы [8, 10].

Экспериментальная часть

В качестве объекта для проведения исследований выбраны образцы продольной радиальной вырезки древесины дуба *Quercus Robur*, подвергнутые воздействию среды насыщенного водяного пара при температуре 200 ± 4 °С. Соответствующее давление пара составило 1,43–1,69 МПа. Катализаторы гидролиза при обработке не использовались. Баротермическая обработка завершалась стадией быстрой декомпрессии, выполняемой в течение не более чем одной секунды («взрывной автогидролиз»). Продолжительность выдержки образцов при заданной температуре и давлении варьировалась в пределах от 5 до 180 сек. Выбор режимов обработки обусловлен не только стремлением внести изменения в химическую природу образцов, но и необходимостью сохранения их приемлемо целостной морфологической структуры после декомпрессии, важной для проведения дальнейшего исследования методом ДМА. Поэтому более жесткие условия обработки не применялись. При этом взрывная декомпрессия рассматривается как необходимое условие своего рода «заморозки» – сохранения состояния системы на момент окончания процесса обработки паром. Влияние «инертности», свойственное условиям постепенного снятия давления, в таких условиях оказывается минимальным. В соответствии с условием, предложенным в работе [11], жесткость процесса баротермической обработки (температурно-временной фактор) оценивались по экспоненциальному закону

$$R_0 = \int_0^t \exp\left(\frac{(T-100)}{14,75}\right) dt,$$

где T – температура процесса обработки, °С, t – продолжительность процесса, мин. При получении исследуемых образцов фактор жесткости составил 290, 440, 880, 1760 и 3700 мин. После баротермической обра-

ботки образцы гидролизованной древесины в одинаковых условиях были подвергнуты сушке при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния.

Исследования методом ДМА выполнены на обратном крутильном маятнике в соответствии с методикой, подробно описанной в [12]. Размер образцов пластинчатой формы, вырезанных вдоль волокон, составил $\sim 100 \times 10 \times 1$ мм³. Частота измерений – 1 Гц, шаг по температуре ~ 1 °С, длительность процесса термостатирования в каждой точке – 5 мин.

В ходе измерений, выполненных в диапазоне температур 25–250 °С, для каждого из образцов получены температурные зависимости динамического модуля сдвига и динамического модуля потерь. В соответствии с методикой, предложенной в [12], для установления точного положения температурных переходов рассчитаны первые производные динамического модуля сдвига. При этом температуре расстекловывания совокупности аморфных компонентов лигноцеллюлозного комплекса в исходной и гидролизованной древесине соответствует температура наиболее выраженного минимума на температурной зависимости первой производной динамического модуля сдвига. Иным способом определения температуры стеклования является нахождение температуры наиболее выраженных пиков на кривых температурных зависимостей динамического модуля потерь.

Обсуждение результатов

Измерения, выполненные методом ДМА, показали, что для образцов с разными условиями баротермической обработки характерны существенные различия в абсолютном значении величины динамического модуля сдвига, а также температуры стеклования комплекса аморфных компонентов древесины.

Зависимость величины динамического модуля сдвига G' древесины дуба при комнатной температуре от жесткости режима водно-тепловой обработки показана на рисунке 1. Наблюдается тенденция уменьшения величины G' с возрастанием жесткости режимов обработки. Наиболее вероятно, что причиной наблюдаемого эффекта является возрастание степени разрушения древесной ткани при воздействии более жестких условий обработки, приводящих к расслоению древесного вещества, образованию пустот и их частичному заполнению низкомолекулярными фрагментами гидролиза лигнина и гемицеллюлоз. При этом следует отметить, что абсолютное значение динамического модуля сдвига при любой из измеренных температур не является однозначно достоверным индикатором влияния уровня внешнего воздействия на древесину. Различия в морфологии образцов подобных материалов даже в исходном состоянии трудноконтролируемы из-за их сложного строения, многокомпонентного состава и существенной зависимости не только от места взятия образцов из дерева, но также направленности вырезки, структуры годичных колец, возраста, наличия дефектов и т.п. Поэтому величина динамического модуля сдвига может существенно флуктуировать от одного образца к другому даже при измерении разных серий образцов, обработанных в одинаковых условиях или вовсе не подвергнутых внешнему воздействию. В данном случае именно эти причины обуславливают значительные погрешности в определении величины G' при комнатной температуре и существенный разброс полученных значений.

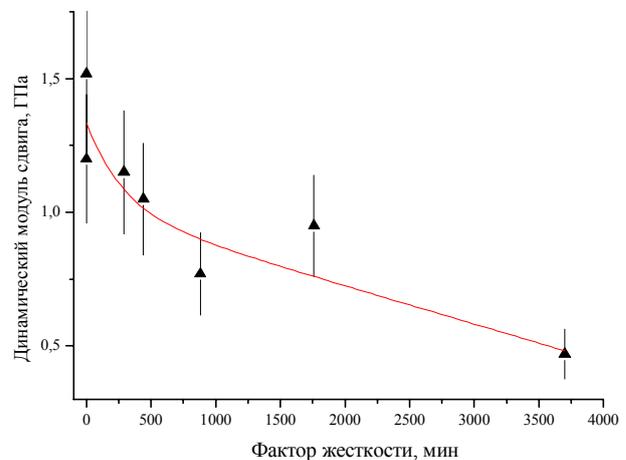


Рис. 1. Зависимость величины динамического модуля сдвига древесины дуба при комнатной температуре от жесткости условий водно-тепловой обработки (точки – экспериментальные значения, линия – данные модельных расчетов)

Наибольший интерес представляют температурные зависимости динамического модуля потерь, а также первой производной динамического модуля сдвига, полученные для каждого из исследованных образцов. С увеличением жесткости гидролиза обнаруживается выраженное смещение температуры стеклования аморфной составляющей в сторону низких температур (табл. 1, рис. 2). Характерно, что температуры максимумов динамического модуля потерь не соответствуют температурам минимумов на температурной производной, и с возрастанием степени жесткости гидролиза данное расхождение существенно усиливается. Если для исходной древесины различие между температурой стеклования, найденной разными способами, невелико и лежит в пределах погрешности эксперимента, то для образцов, обработанных при жесткости процесса свыше 880 мин, оно становится значительным и уже не может быть объяснено влиянием погрешности эксперимента.

По сравнению с исходной древесиной максимальное уменьшение температуры стеклования, обнаруживаемое по температурной производной, составляет 75 °С, в то время как определяемое по максимуму динамического модуля потерь оно не превышает 45 °С. Исследования, выполненные ранее [8–10, 13], показывают, что водно-термическая обработка измельченной древесины березы, сосны и лиственницы с последующим горячим прессованием в композиционный материал «Термобалит», существенно снижает температуру стеклования аморфной части материала. Было выявлено, что при использовании разных по степени жесткости режимов обработки (температура и продолжительность процесса, наличие и концентрация катализатора), уменьшение температуры стеклования комплекса аморфных компонентов по сравнению с исходной древесиной березы, лиственницы и сосны может составлять до 100–140 °С, что свидетельствует о глубоких преобразованиях в молекулярной и морфологической структуре древесины при жестких режимах обработки [8, 9]. При этом следует отметить, что исследования методом ДМА влияния режимов баротермической обработки на вязкоупругие характеристики древесных материалов, не подвергнутых после гидролиза процессу горячего прессования и поликонденсации, до настоящего времени никем не проводились.

Вероятно, столь существенное уменьшение температуры стеклования аморфной составляющей в гидролизованных образцах по сравнению с исходной древесиной, обусловлено увеличением гибкости молекулярных цепей лигноуглеводного комплекса. Образующиеся при гидролизе редуцирующие вещества и фрагменты низкомолекулярного лигнина пластифицируют древесное вещество, облегчая подвижность его кинетических структур. Усиление эффекта также возможно за счет увеличения сегментальной подвижности молекул лигнина, частично деполимеризованного при гидролизе.

Однозначную интерпретацию существенных различий между величиной температуры стеклования, обнаруживаемой по первой производной и динамическому модулю потерь для образцов, обработанных в одинаковых условиях, дать затруднительно. Из данных, представленных в таблице 2 и на рисунке 3, следует, что пик динамического модуля потерь имеет неодинаковую ширину, но завершается приблизительно при одинаковой температуре для всех образцов, независимо от условий их обработки. Возможно, структуру данных пиков следует рассматривать как наложение двух максимумов, из которых более высокотемпературный относится к остаткам исходного (нативного) гемицеллюлозного комплекса древесины, не разрушенного при гидролизе, а низкотемпературный – к совокупности аморфных продуктов.

Таблица 1. Зависимость температуры стеклования аморфной части древесного комплекса от жесткости условий взрывного автогидролиза

Фактор жесткости взрывного автогидролиза, мин	Температура стеклования, °С	
	по минимуму первой производной	по максимуму динамического модуля потерь
0, контрольный	209	211
0, контрольный, молодая древесина	207	208
290	210	214
440	193	201
880	169	186
1760	149	175
3700	135	167

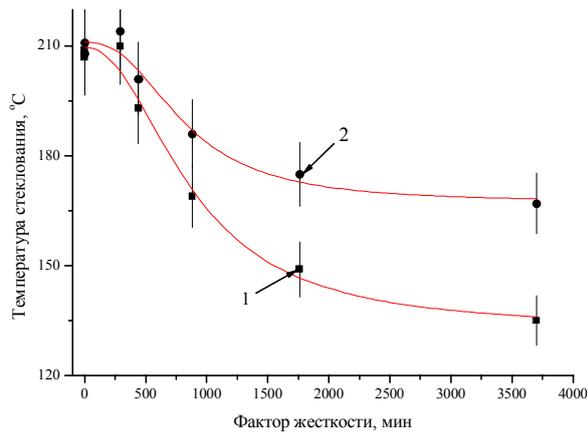


Рис. 2. Зависимость температуры стеклования аморфной части древесного комплекса от жесткости условий взрывного гидролиза (1 – определена по минимуму температурной производной динамического модуля сдвига, 2 – определена по пику динамического модуля потерь)

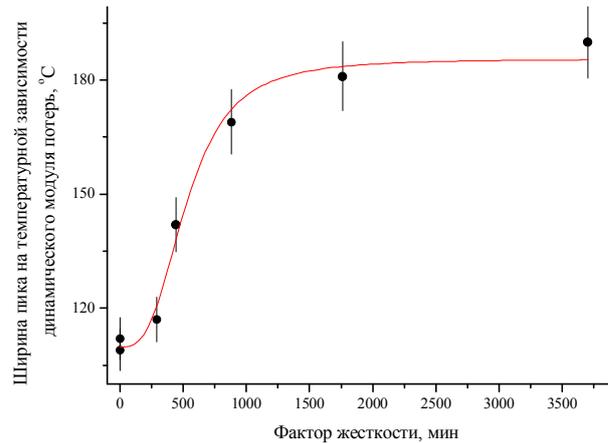


Рис. 3. Зависимость ширины пика (на температурной зависимости динамического модуля потерь) от жесткости условий взрывного автогидролиза

Таблица 2. Зависимость параметров пика (на температурной зависимости динамического модуля потерь) от жесткости условий взрывного автогидролиза

Фактор жесткости взрывного автогидролиза, мин	Температура, °C		Ширина пика, °C
	начала пика	конца пика	
0, контрольный	150	259	109
0, контрольный, молодая древесина	150	262	112
290	147	264	117
440	125	267	142
880	98	267	169
1760	82	263	181
3700	75	265	190

По характеру зависимостей, представленных на рисунке 2, можно сделать вывод о невозможности значительного уменьшения температуры стеклования аморфной части древесины, обрабатываемой в условиях жесткости процесса свыше 2000 мин. По-видимому, разрушение лигноуглеводной части древесины дуба при таких условиях близко к своему пределу, и дальнейшая деструкция преимущественно связана с разрывом макромолекул целлюлозы на отдельные фрагменты. Косвенным подтверждением сказанного может служить невозможность сохранения целостной морфологической структуры образцов, полученных при более высокой жесткости процесса. Более существенное уменьшение температуры стеклования, описанное в [8–10, 13], вероятно, обусловлено действием катализаторов, а также различиями в породах древесины и иной методике получения образцов.

Выводы

Методом динамической механической спектрометрии установлены температурные зависимости динамического модуля сдвига древесины дуба *Quercus Robur*, подвергнутой обработке методом взрывного автогидролиза. Обнаружена тенденция уменьшения величины динамического модуля сдвига и значительное уменьшение температуры стеклования комплекса аморфных компонентов древесины с увеличением фактора жесткости гидролиза. При наиболее жестких условиях обработки паром уменьшение температуры стеклования в сравнении с исходной древесиной, обнаруженное по температурной производной динамического модуля сдвига, составляет 75 °C, а по зависимости динамического модуля потерь – до 45 °C. Значительное смещение температуры стеклования в сторону низких температур с возрастанием жесткости гидролиза обусловлено увеличением гибкости молекулярных цепей лигноцеллюлозного комплекса и пласти-

фикацией древесного вещества. Пик механических потерь следует рассматривать как наложение двух максимумов, из которых более высокотемпературный относится к остаткам исходного (нативного) гемицеллюлозного комплекса древесины, а низкотемпературный – к совокупности аморфных продуктов гидролиза древесины. Увеличение фактора жесткости процесса обработки древесины дуба свыше 2000 мин. нецелесообразно из-за дальнейшего незначительного уменьшения температуры стеклования аморфной части древесины и невозможности сохранения целостной морфологической структуры образцов при подобных условиях обработки.

Список литературы

1. Kurian J.K., Nair G.R., Hussain A., Vijaya Raghavan G.S. Feedstocks, logistics and pre-treatment processes for sustainable lignocellulosic biorefineries: A comprehensive review Renewable and Sustainable // Energy Reviews. 2013. Vol. 25. Pp. 205–219. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.019.
2. Negro M.J., Manzanares P., Oliva J.M., Ballesteros I., Ballesteros M. Changes in various physical/chemical parameters of Pinus Pinaster wood after steam explosion pretreatment // Biomass and Bioenergy. 2003. Vol. 25. Pp. 301–308. DOI: 10.1016/S0961-9534(03)00017-5.
3. Asada C., Sasaki C., Uto Y., Sakafuji J., Nakamura Y. Effect of steam explosion pretreatment with ultra-high temperature and pressure on effective utilization of softwood biomass // Biochemical Engineering Journal. 2012. Vol. 60. Pp. 25–29. DOI: 10.1016/j.bej.2011.09.013.
4. Yu Z., Zhang B., Yu F., Xu G., Song A. A real explosion: The requirement of steam explosion pretreatment // Biorenewable Technology. 2012. Vol. 121. Pp. 335–341. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.06.055.
5. Fengel D., Wegener G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin, 1989. 613 p.
6. Шахзадян Э.А., Квачев Ю.П., Папков В.С. Температурные переходы в древесине и ее компонентах // Высокомолекулярные соединения. 1992. Серия А. Т.34, № 9. С. 3–14.
7. Шахзадян Э.А., Квачев Ю.П., Папков В.С. Динамические механические свойства некоторых пород древесины // Высокомолекулярные соединения. 1994. Серия А. Т. 36, № 8. С. 1298–1303.
8. Скурыдин Ю.Г. Строение и свойства композиционных материалов, полученных из отходов древесины после взрывного гидролиза: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2000. 135 с.
9. Скурыдина Е.М. Разработка технологии композиционных материалов на основе древесины и полимерных наполнителей: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2006. 170 с.
10. Startsev O.V., Salin B.N., Skuridin Y.G., Utemesov R.M., Nasonov A.D. Physical Properties and Molecular Mobility of New Wood Composite Plastic «Thermobalite» // Wood Sci Technol. 1999. Vol. 33. Pp. 73–83. DOI: 10.1007/s002260050100.
11. Overend R.P., Chornet E. Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments // Philos. Trans. Roy. Soc. London. 1987. Vol. A 321. N 1561. Pp. 523–536. DOI: 10.1098/rsta.1987.0029.
12. Старцев О.В., Сортыяков Е.Д., Исупов В.В., Насонов А.Д., Коваленко А.А., Кротов А.С., Скурыдин Ю.Г. Акустическая спектроскопия полимерных композитных материалов, экспонированных в открытом космосе // Экспериментальные методы в физике структурно-неоднородных сред. Барнаул, 1997. С. 32–39.
13. Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermalhydrolysis of wood in presence of mineral acids // Doklady Chemical Technology. 2000. Vol. 370(5). Pp. 638–641.

Поступила в редакцию 18 марта 2018 г.

После переработки 22 апреля 2018 г.

Принята к публикации 7 мая 2018 г.

Для цитирования: Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., Коньшин В.В., Афаньков А.Н., Юку Ногба Жан, Беушев А.А. Изучение флавоноидов и антидепрессантной активности листьев и жидкого экстракта боярышника полумягкого // Химия растительного сырья. 2018. №4. С. 255–261. DOI: 10.14258/jcrpm.2018043856.

Skurydin Yu.G.¹, Skurydina E.M.², Kon'shin V.V.^{3*}, Afan'kov A.N.³, Yuku Nogba Jan³, Beushev A.A.³ INFLUENCE OF EXPLOSIVE AUTOHYDROLYSIS ON DYNAMIC MECHANICAL CHARACTERISTICS OF WOOD OAK *QUERCUS ROBUR*

¹Altai State University, pr. Lenina, 61, Barnaul, 656049 (Russia), e-mail: skur@rambler.ru

²Altai State Pedagogical University, ul. Molodezhnaya, 55, Barnaul, 656031 (Russia), e-mail: skudem@mail.ru

³Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, pr. Lenina, 46, Barnaul, 656038 (Russia), e-mail: vadandral@mail.ru

The dynamic dependencies of the dynamic shear modulus and the loss modulus of *Quercus Robur* L. oak wood, subjected to pretreatment by explosive autohydrolysis, were obtained by dynamic mechanical analysis. It is shown that, as a result of an increase in the degree of hydrolysis stiffness, the glass transition temperature of the complex of amorphous wood components decreases. The maximum decrease in the glass transition temperature in comparison with the initial wood, determined from the positions of the minimum temperature derivative of the dynamic shear modulus and the peak at the temperature dependence of the dynamic loss modulus, is 75 °C and 45 °C, respectively. With increasing rigidity of the conditions of barothermal processing, the value of the dynamic shear modulus tends to decrease at room temperature. It was found that the temperatures of the maxima position on the temperature dependences of the dynamic loss modulus do not correspond to the temperatures of the minima on the temperature derivative, and with the increase in the degree of hydrolysis stiffness this discrepancy is significantly increased. Assumptions are made about the nature of the processes occurring in the wood tissue and causing these effects. It is most likely that the decrease in the glass transition temperature of the amorphous component in the samples of the hydrolyzed wood substance compared to the original wood is a consequence of the increase in the flexibility of the molecular chains of the lignocarbon complex. Reducing substances and fragments of low molecular weight lignin, formed during hydrolysis, act as a plasticizer and facilitate the mobility of the kinetic components of the wood substance.

Keywords: dynamic shear modulus, dynamic loss modulus, wood, hydrolysis, explosive autohydrolysis, glass transition temperature, rigidity factor.

References

1. Kurian J.K., Nair G.R., Hussain A., Vijaya Raghavan G.S. *Energy Reviews*, 2013, vol. 25, pp. 205–219. DOI: 10.1016/j.rser.2013.04.019.
2. Negro M.J., Manzanares P., Oliva J.M., Ballesteros I., Ballesteros M. *Biomass and Bioenergy*, 2003, vol. 25, pp. 301–308. DOI: 10.1016/S0961-9534(03)00017-5.
3. Asada C., Sasaki C., Uto Y., Sakafuji J., Nakamura Y. *Biochemical Engineering Journal*, 2012, vol. 60, pp. 25–29. DOI: 10.1016/j.bej.2011.09.013.
4. Yu Z., Zhang B., Yu F., Xu G., Song A. *Bioresource Technology*, 2012, vol. 121, pp. 335–341. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.06.055.
5. Fengel D., Wegener G. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*, Berlin, 1989, 613 p.
6. Shakhzadyan E.A., Kvachev Yu.P., Papkov V.S. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*. [High molecular weight compounds], 1992, seriya A, vol. 34, no. 9, pp. 3–14. (in Russ.).
7. Shakhzadyan E.A., Kvachev Yu.P., Papkov V.S. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya*. [High molecular weight compounds], 1994, seriya A, vol. 36, no. 8, pp. 1298–1303. (in Russ.).
8. Skurydin Yu.G. *Stroyeniye i svoystva kompozitsionnykh materialov, poluchennykh iz otkhodov drevesiny posle vzryvnogo gidroliza: dis. ... kand. tekhn. nauk*. [The structure and properties of composite materials obtained from waste wood after explosive hydrolysis: dis. ... Cand. tech. sciences]. Barnaul, 2000. 135 p. (in Russ.).
9. Skurydina Ye.M. *Razrabotka tekhnologii kompozitsionnykh materialov na osnove drevesiny i polimernykhnapolniteley: dis. ... kand. tekhn. nauk*. [Development of technology for composite materials based on wood and polymer fillers: dis. ... Cand. tech. sciences]. Barnaul, 2006. 170 p. (in Russ.).
10. Startsev O.V., Salin B.N., Skuridin Y.G., Utemesov R.M., Nasonov A.D. *Wood Sci Technol*, 1999, vol. 33, pp. 73–83. DOI: 10.1007/s002260050100.
11. Overend R.P., Chornet E. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 1987, vol. A 321, no. 1561, pp. 523–536. DOI: 10.1098/rsta.1987.0029.
12. Startsev O.V., Sortyyakov Ye.D., Isupov V.V., Nasonov A.D., Kovalenko A.A., Krotov A.S., Skurydin Yu.G. *Ekspерimental'nyye metody v fizike strukturno – neodnorodnykh sred*. [Experimental methods in physics of structurally inhomogeneous media]. Barnaul, 1997, pp. 32–39. (in Russ.).
13. Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. *Doklady Chemical Technology*, 2000, vol. 370(5), pp. 638–641.

Received March 18, 2018

Revised April 22, 2018

Accepted May 7, 2018

For citing: Skurydin Yu.G., Skurydina E.M., Kon'shin V.V., Afan'kov A.N., Yuku Nogba Jan, Beushev A.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 4, pp. 255–261. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2018043856.

* Corresponding author.

