

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АДГЕЗИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ ДРЕВЕСИНЫ И БУРОГО УГЛЯ ПРИ БРИКЕТИРОВАНИИ

Т.М. Соловьев¹, О.Н. Буренина¹, Б.Н. Заровняев², Л.А. Николаева¹

¹ Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия, e-mail: tuskulsolovev@yandex.ru

² Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

Аннотация: На сегодняшний день все большую актуальность приобретают исследования по разработке технологий получения экологически чистого топлива с вовлечением в производство возобновляемых вторичных растительных ресурсов. Данная работа относится к вопросу использования древесных отходов как связующей добавки при брикетировании плотных зрелых бурых углей марок 2Б и 3Б. Целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, составляющие основу древесины, будучи полимерными соединениями, обладают вязкоупругими свойствами. Отдельно стоит отметить лигнин, который является термопластичным, и при повышении температуры способен переходить в высокоэластичное или вязкотекучее состояние. Поэтому с целью выявления фазовых переходов полимерных компонентов и установления оптимальной температуры прессования брикетной смеси исследованы вязкоупругие свойства древесины сосны методом динамического механического анализа в зависимости от изменения температуры. Помимо областей изменения упругих и пластических свойств древесины, показано влияние содержания воды на реологические свойства полимерных компонентов древесины. Результаты структурных исследований древесных брикетированных образцов, а также физико-механических испытаний древесно-угольных брикетов подтверждают полученные данные исследования вязкоупругих свойств древесины. В диапазоне температур 80–100 °С, при котором выявлено снижение модуля накопления (E') и повышение модуля потерь (E''), при физико-механическом испытании установлено значительное повышение показателя их прочности при сжатии наравне с увеличением размера уплотнения и уменьшением упругого расширения брикетированного продукта.

Ключевые слова: топливный брикет, бурый уголь, вязкоупругие свойства древесины, динамический механический анализ, брикетирование угля, прочность при сжатии, пластическая деформация, температурная зависимость.

Для цитирования: Соловьев Т. М., Буренина О. Н., Заровняев Б. Н., Николаева Л. А. Влияние температуры на адгезионную способность компонентов древесины и бурого угля при брикетировании // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 109–122. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_109.

Temperature effect on adhesive capacity of wood and lignite in briquetting

T.M. Solov'ev¹, O.N. Burenina¹, B.N. Zarovnjaev², L.A. Nikolaeva¹

¹ Institute of Oil and Gases Problems of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia, e-mail: tuskulsolovev@yandex.ru

² M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

Abstract: Clean fuel production using renewable plant resources is one of the top-priority goals these days. Spotlight of this study is on the use of refuse wood as a binder in briquetting of massive mature lignite grades 2B and 3B. Cellulose, hemicelluloses and lignin, as three polymeric components of wood cells, possess viscoelasticity. Lignin, taken individually, is thermoplastic and can drop into highly elastic or visco-flow state under higher temperature. Aimed to define phase transitions of the polymeric components and to optimize the briquetting temperature, the viscoelastic properties of pine wood are studied using the method of the dynamic mechanical analysis as function of temperature variation. Alongside the change in the elastic and plastic properties of wood, the effect of water content on rheological properties of the test polymeric components is demonstrated. The structural tests of wooden briquettes and the mechanical analysis of coal-and-wood briquettes validate the obtained data on the viscoelastic properties of wood. In the temperature range of 80–100°C, the storage modulus decreases and the loss modulus increases. The mechanical tests reveal that in the same temperature range, the briquetted products experience the increasing compression strength and compaction and the decreasing elastic expansion.

Key words: fuel briquette, lignite, viscoelastic properties of wood, dynamic mechanical analysis, coal briquetting, compressive strength, plastic deformation, temperature dependence.

For citation: Solov'ev T. M., Burenina O. N., Zarovnjaev B. N., Nikolaeva L. A. Temperature effect on adhesive capacity of wood and lignite in briquetting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):109-122. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_109.

Введение

Одной из ключевых проблем в топливно-энергетическом комплексе Якутии на протяжении долгих лет является обеспечение социально-бытовой сферы республики качественными твердотопливными энергоресурсами. Добываемые угли на сегодняшний момент реализуются в рядовом виде, что существенно сказывается на качестве поставляемого топлива. В итоге это приводит не только к снижению эффективности сжигания, но и к существенным количественным потерям во время транспортировки угля [1, 2].

Данная проблема указывает на наличие определенного спроса на сортовое твердое топливо на территории Якутии. Одним из способов получения твердого топлива с улучшенными эксплуатационными характеристиками является брикетирование низкосортных мелкофракционных углей.

Брикетирование по сути является процессом уплотнения и упрочнения сыпучего материала под воздействием внешнего давления вследствие сближения частиц и появления между ними сил сцепления. Технологию получения и качество брикета во многом определяют такие свойства, как твердость, хрупкость, упругость и пластичность. И в зависимости от свойств угля существуют две разные технологии брикетирования: брикетирование без связующих и с применением связующих веществ [3].

Без связующих веществ могут брикетироваться в основном «молодые» бурые угли (марка 1Б), которые характеризуются высокой пластичностью и малой упругостью, но при достаточном высоких давлениях прессования (100–150 МПа) [4, 5]. Согласно современным представлениям о механизме окусковывания углей, этому способствуют как особенности надмолекулярной организации, так

и наличие в составе низкометаморфизованных углей большого количества активных функциональных центров (например, кислородсодержащие функциональные группы), благодаря чему при уплотнении данных углей происходит сильное межмолекулярное взаимодействие между частицами на границе их контакта [3–5].

Дальнейший процесс углефикации снижает брикетирующую способность угля из-за отщепления активных кислородсодержащих функциональных групп и образования конденсированных ароматических систем, приводящих к упорядочиванию и уплотнению структуры угля, в результате чего пластичность угля снижается и повышается его упругость. Поэтому для брикетирования метаморфизованных углей применяют специальные связующие вещества с высокой адгезионной способностью.

Следует отметить, что на данный момент в мире большое внимание уделяется исследованиям, которые направлены на разработку технологий получения

топлива из биомассы, в том числе твердых агломерированных топливных продуктов, а также смесевых топлив на основе разных типов угля с биомассой [6–8]. Это обусловлено тем, что биомасса относится к экологически чистым возобновляемым источникам энергии, а также тем, что окусковывание растительной массы протекает без использования дополнительных связующих веществ.

Учитывая огромные запасы бурого угля в Якутии и сравнительно низкий спрос на него из-за низких эксплуатационных характеристик (высокая влажность, низкая теплотворная способность, низкая атмосферостойчивость), а также отсутствие на территории Якутии промышленной переработки древесных отходов, перспективными выглядят исследования в области разработки технологии получения окускованного топлива на основе бурого угля и древесных отходов.

Процесс прессования сыпучих материалов состоит из нескольких стадий,

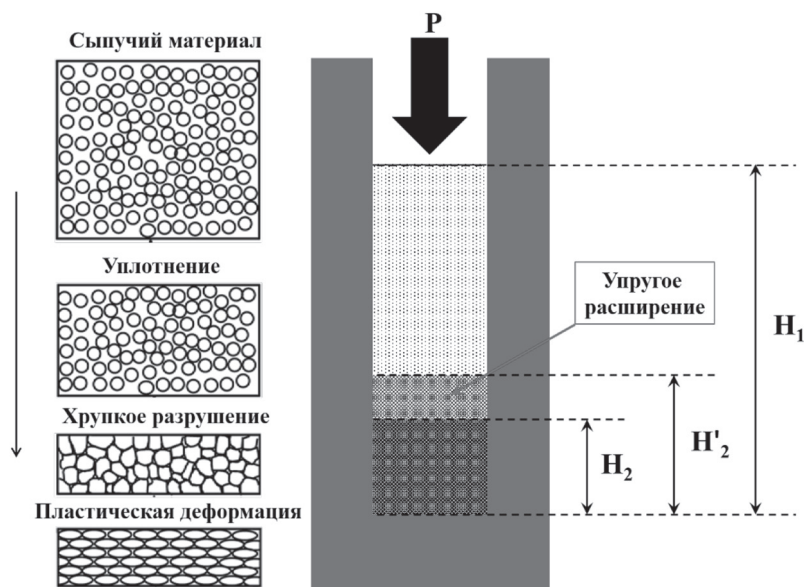


Рис. 1. Схематический вид прессования сыпучих материалов
Fig. 1. Schematic drawing of pressing of granular materials

во время которого протекают различные необратимые и обратимые деформации (рис. 1). В начальной стадии частицы уплотняются и образуется поверхностный контакт, во время которого воздух выдавливается из внутреннего объема прессуемого материала. При дальнейшем увеличении давления происходит раздавливание и хрупкое разрушение частиц. Важнейшей характеристикой, обуславливающей получение прочного окускованного продукта из твердых сыпучих веществ, является способность материала подвергаться значительным пластическим деформациям, так как во время них наиболее ощутимо проявляются силы межмолекулярного взаимодействия, в результате чего и происходит формирование структуры конечного продукта. Следует отметить, что хрупкое разрушение и пластическая деформация являются необратимыми деформациями. А обратимая деформация происходит после снятия давления в виде упругого расширения, которое вызывает ослабление структуры материала. Соотношение обратимых и необратимых деформаций в конечном итоге обуславливает прочностные свойства прессованного продукта. Таким образом, физико-механические и физико-химические свойства исходных материалов определяют технологию их окусковывания [9, 10].

Одной из отличительных и важнейших характеристик полимерных материалов, особенно термопластичных полимеров, обуславливающих технологию их обработки и переработки, является изменение вязкоупругих свойств в зависимости от повышения температуры. В диапазоне температур, превышающих

температуру стеклования полимера, происходит фазовый переход в область высокоэластичного и вязкотекучего состояний, при этом повышается адгезионная способность материала [11]. Таким образом, основная идея данной работы заключается в получении прессованного твердого топлива из бурого угля и древесных опилок за счет повышения адгезионной способности полимерных компонентов древесины при повышении температуры. Одним из инструментальных качественных способов выявления фазовых переходов и исследования вязкоупругих свойств компонентов древесины является динамический механический анализ [12], результаты которого представлены в данной статье.

Материалы и методы исследования

В работе был использован бурый уголь Кангаласского месторождения, которое расположено на берегу р. Лены около г. Якутска и служит топливной базой преимущественно для обеспечения углем близлежащих центральных районов Якутии. В таблице показаны основные показатели данных углей. Технический анализ углей был проведен в научно-учебной испытательной лаборатории «Физико-химии углей» НИТУ «МИСиС» в г. Москве. Уголь характеризуется довольно высокой теплотворной способностью, средней зольностью, низким содержанием серы. Угли относятся к технологическим группам 2Б и 3Б. Одним из отрицательных качеств данных углей является их неустойчивость при хранении и склонность к самовозгоранию. Поэтому с целью улучшения атмосферостойкости и повышения эксп-

Результаты технического анализа бурых углей Кангаласского месторождения Technical analysis data of Kangalass lignite

W ^t , %	W ^a , %	A ^d , %	V ^{daf} , %	S _s ^d , %	Q _s ^{daf} , ккал/кг	C ^d , %	H ^d , %
29,0	8,7	14,8	49,0	0,24	6807	65,0	4,67

луатационных характеристик их целесообразно брикетировать.

В качестве древесного сырья были использованы опилки из сосны. Данная порода древесины входит в число наиболее распространенных на территории Якутии. Как было отмечено выше, температура играет важную роль при формировании прочной структуры во время прессования, так как она влияет на деформационные свойства полимерного вещества, в данном случае на поликомпонентный материал — древесину, — основу которого составляют три биополимера: целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Поэтому для установления оптимального температурного режима прессования исследованы вязкоупругие свойства древесины методом динамического механического анализа. Исследование было проведено на приборе DMA 242C (Netzsch, Германия) на базе центра коллективного пользования Байкальского института природопользования СО РАН. Принцип анализа состоит в воздействии на образец осциллирующей синусоидальной нагрузки и регистрации обратного отклика материала. Полученный сигнал содержит информацию о модуле накопления E' (упругий модуль), модуле потерь E'' (вязкий модуль), коэффициенте механических потерь $\tan\delta$ (равен отношению модуля вязкости к модулю упругости):

$$E' = \frac{\sigma^\circ}{\varepsilon^\circ} \cos\delta; \quad (1)$$

$$E'' = \frac{\sigma^\circ}{\varepsilon^\circ} \sin\delta; \quad (2)$$

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'}, \quad (3)$$

где σ° и ε° — это амплитуды напряжения и деформации; δ — это фаза сдвига между ними. E' характеризует упругость, способность сохранять энергию материала при циклической нагрузке, в то время как E'' показывает пластич-

ность и способность материала рассеивать энергию в виде тепла. Пластическая деформация отражается в виде потерянной энергии [13].

Испытание проводилось в режиме трехточечного изгиба при постоянной частоте 1 Гц в диапазоне температур от 25 °С до 300 °С в инертной среде (аргон). Образцы для анализа представляли собой древесные пластинки с размерами: 20х10х3 мм. Известно, что вода играет роль пластификатора в древесине [14], поэтому в данном исследовании были подвергнуты к испытанию «увлажненные» и «сухие» образцы. Для этого часть образцов была помещена во влажную среду, и выдержана там в течение недели, общий прирост массы при этом составил 10—15%. Часть образцов, наоборот, была высушена до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105 °С.

Для выявления изменения поверхностной структуры с помощью электронного микроскопа JEOL JSM-7800F были получены снимки поверхности образцов древесных брикетов, изготовленных при разных температурах прессования.

Также было исследовано влияние температуры прессования на прочность образцов. Для этого были приготовлены образцы цилиндрической формы из смеси буроугольного порошка и древесных опилок при следующих условиях: давление прессования — 100 МПа, содержание древесных опилок — 10 мас.%, влажность смеси — 10%, температура прессования варьировалась от 25 °С до 100 °С. Подготовка буроугольного порошка заключалась в измельчении и просеивании через сито (2,5 мм), древесные опилки также были просеяны (1,25 мм). Прочность брикетов была оценена методом сжатия согласно ГОСТ 21289-2018 на универсальной испытательной машине «UTS-2» [15].

Кроме этого, были рассчитаны деформационные характеристики исследуе-

мых образцов в процессе прессования, с помощью которых можно проследить характер изменения упругих и пластических деформаций при повышении температуры прессования. При вычислении данных характеристик был использован метод, который описывается в работе И.Д. Ремесникова [9]. Сущность данного метода схематически показана на рис. 1. В начале прессования брикетная смесь характеризуется некой первоначальной высотой H_1 , которая зависит от насыпной плотности смеси. В момент заданного максимального давления смесь уплотняется до высоты H_2 , а после снятия давления прессованный материал расширяется до своей конечной высоты H'_2 . Используя эти данные, можно рассчитать коэффициент уплотнения (K_1) и коэффициент упругого расширения (K_2):

$$K_1 = \frac{H_1}{H_2}; \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{H'_2}{H_2}. \quad (5)$$

Результаты и обсуждение

Температурные зависимости модуля накопления E' , потери E'' «увлажненных» образцов показаны на рис. 2. На графике изменения выделяются несколько переходов: в диапазоне от 60 °С до 120 °С происходит плавное повышение, дальнейшее повышение температуры до 210 °С не вызывает существенных изменений, а после 210 °С происходит полное падение модуля накопления. На кривой изменения E'' наблюдаются образование двух пиков при 95 °С и 240 °С. Полученные данные хорошо коррелируются с результатами аналогичных исследований [14, 16, 17]. В данных работах было исследовано влияние адсорбции и десорбции влаги на вязкоупругие свойства древесины хвойного дерева *Cunninghamia* методом ДМА. Показано,

что при десорбции влаги происходит повышение E' и снижение E'' . При адсорбции воды образуются водородные связи между молекулами воды и функциональными группами компонентов древесины, особенно активно взаимодействуют гидроксильные группы, которые присутствуют во всех трех полимерных составляющих древесины. Сокращение межмолекулярных водородных связей между полимерными компонентами древесины приводит к снижению жесткости и увеличению демпфирующей способности древесины или, другими словами, увеличивается пластичность материала. Так как наше исследование проводилось без поддержания постоянной влажности окружающей среды, с повышением температуры произошло испарение воды, которое привело к увеличению показателя E' . А до испарения влаги образцы были более пластичны, и поэтому наблюдается увеличение E'' в интервале температур 25–95 °С.

Если рассматривать кривые E' и E'' «сухих» образцов, то наблюдается небольшое снижение E' после 80 °С, и повышение E'' начиная с ≈80 °С (рис. 3). В данном случае была попытка исключить влияние воды на вязкоупругое поведение компонентов древесины. Поэтому данный эффект связан уже с изменением реологических свойств полимерных составляющих древесины. Как правило, с ростом температуры происходит интенсификация колебательных движений молекул, которое приводит к увеличению сегментальной подвижности цепи полимера, в результате чего уменьшаются упругие свойства материала. Кроме того, в литературе было отмечено, что в области 85–100 °С происходит частичный разрыв внутри- и межмолекулярных водородных связей между компонентами древесины, особенно из аморфных частей полимеров, при этом повышается их конформационная

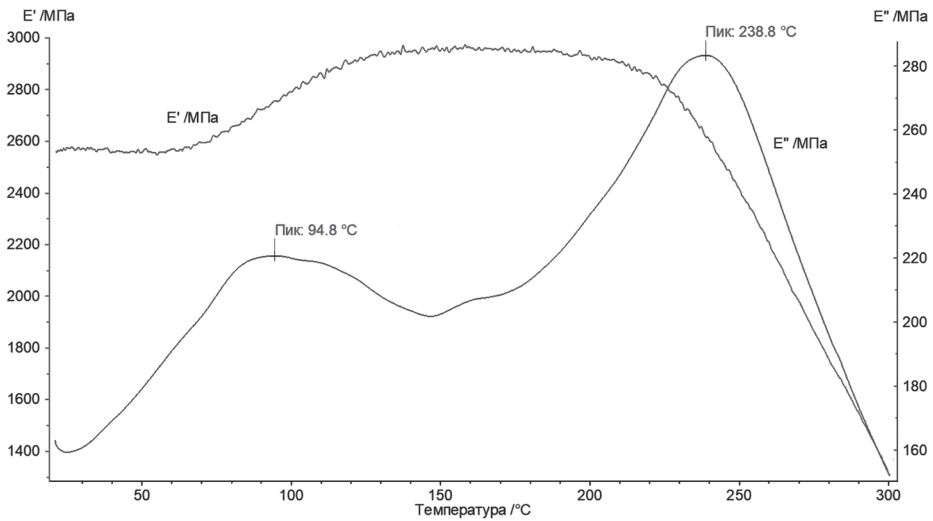


Рис. 2. Температурные зависимости модуля накопления E' и модуля потерь E'' для «увлажненных» образцов древесины сосны

Fig. 2. Temperature dependences of storage modulus E' and loss modulus E'' for damped samples of pine wood

подвижность [18–21]. В совокупности все эти факторы приводят к понижению E' и повышению E'' , которое наблюдается на рис. 3.

Интересные результаты были получены в работе [18], в которой авторы исследовали вязкоупругие свойства вы-

деленного из древесины лигнина и выявили, что в диапазоне 140–200 °C происходит сильное падение показателей E' и E'' . При осмотре внешнего вида лигнина авторы отметили, что лигнин при этом темнел, размягчался и становился вязким и липким. Однако в проведенных

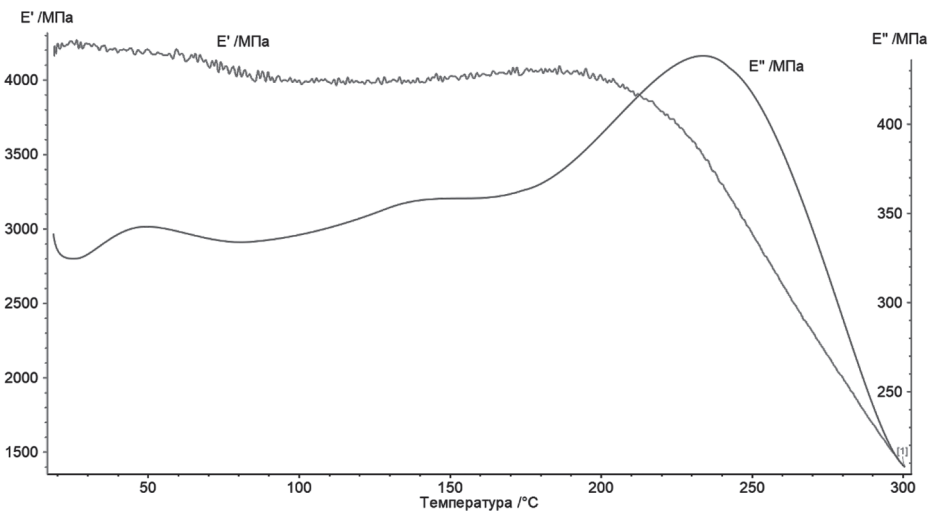


Рис. 3. Температурные зависимости модуля накопления E' и модуля потерь E'' для «сухих» образцов древесины сосны

Fig. 3. Temperature dependences of storage modulus E' and loss modulus E'' for dry samples of pine wood

исследованиях существенных изменений E' и E'' в диапазоне 140–200 °С не наблюдалось. Скорее всего это связано с тем, что лигнин в древесине прочно связан с гемицеллюлозой и целлюлозой, поэтому при комплексном исследовании древесины идентифицировать фазовый переход отдельно лигнина довольно сложно.

Полное падение E' и E'' после 210 °С и 240 °С в обоих случаях исследования «увлажненных» и «сухих» образцов древесины (рис. 2 и 3) связано с термической деструкцией компонентов древесины [21]. В работе [21] авторы провели пиролиз целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина по отдельности и выявили стадии их термического разложения. Было установлено, что основные газовые продукты термического разложения органического вещества, такие как CO_2 , COCH_4 , начинают проявляться после 200 °С.

На рис. 4 показаны кривые изменения $\tan\delta$ в зависимости от температуры. Данный параметр показывает соотношение E' и E'' и тем самым устанавливает преобладание того или иного вида деформации. Как видно из рис. 4, у «ув-

лажненных» образцов наблюдается образование пика при 85 °С, который связан с повышением вязкого модуля E'' . Это указывает на то, что в данной области температур «увлажненные» образцы более вязки и пластичны. Если сравнивать кривые $\tan\delta$ «увлажненных» и «сухих» образцов, то отчетливо видно, что вода существенно влияет на вязкоупругое поведение древесины, она смягчает древесину и тем самым увеличивает пластичность материала (рис. 4).

С помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7800F получены снимки поверхности прессованных образцов из измельченной древесины, чтобы можно было наблюдать изменения структуры и протекание фазовых переходов древесных компонентов во время прессования при повышенной температуре. Образцы изготовлены при одинаковом давлении прессования (100 МПа) и влажности сырья (10 мас.%), но при разных температурах прессования (25 °С и 100 °С).

Как видно из полученных снимков, при температуре прессования 100 °С структура древесных брикетов получа-

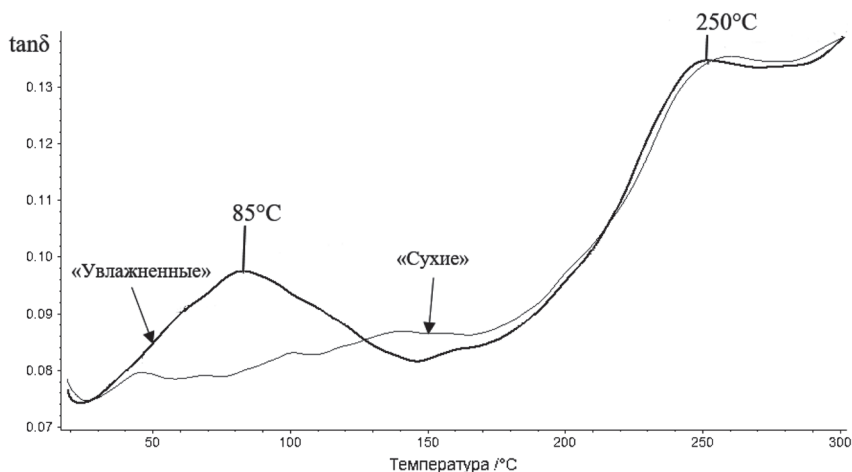


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента механических потерь $\tan\delta$ для «увлажненных» и «сухих» образцов древесины сосны

Fig. 4. Temperature dependence of mechanical loss factor $\tan\delta$ for damped and dry samples of pine wood

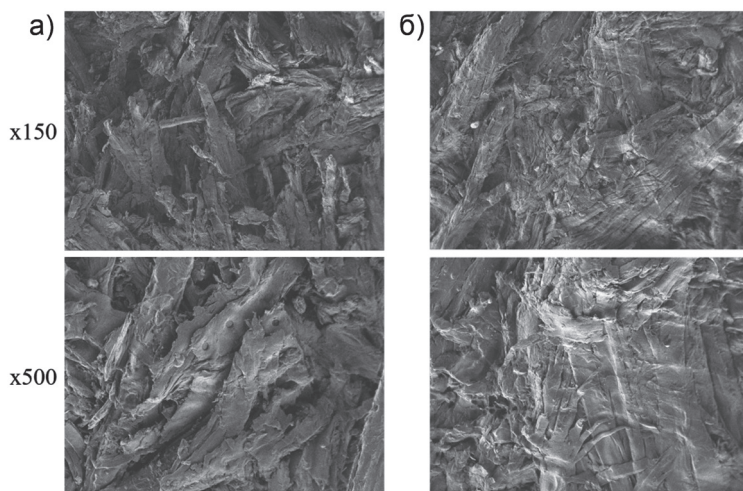


Рис. 5. Изображения поверхности прессованных древесных образцов, полученных при разных температурах прессования: 25 °С (а); 100 °С (б); при увеличении $\times 150$ (верхние) и $\times 500$ (нижние)

Fig. 5. Surface images of wood samples after pressing under different temperatures: (a) 25°C; (b) 100°C; amplification $\times 150$ (top) and $\times 500$ (bottom)

ется более плотно упакованной (рис. 5, б), чем при прессовании при комнатной температуре (рис. 5, а). При высокотемпературном прессовании пористого размягченного материала происходит сильное уплотнение и взаимное проникание частей, что обуславливается увеличением площади взаимодействия разобоченных частиц. Это способствует образованию новых межмолекулярных связей, повышающих когезионную и адгезионную прочность прессованного сырья. Полученные изображения подтверждают результаты исследования вязкоупругих свойств древесины. Во время прессования древесного сырья при температуре 100 °С наблюдаются характерные признаки фазового перехода полимерных компонентов древесины (рис. 5, б): видны следы плавления и образования плотного контакта в местах примыкания частиц древесины.

Похожие процессы были отмечены в работах [18, 22], где авторы связывали эти наблюдения с поведением лигнина, который обладает термопластическими свойствами.

Для выявления влияния температуры на связующие свойства измельченной древесины при получении буроугольных брикетов был оценен характер изменения упругих и пластических деформаций при повышении температуры прессования путем расчета деформационных характеристик исследуемых образцов: коэффициента уплотнения (K_1), коэффициента упругого расширения (K_2) и плотности прессованного образца. Данные показатели отражают величину уплотнения, пластических и упругих видов деформации, соотношение которых и предопределяет прочностные качества прессованного продукта.

Образцы были изготовлены при одинаковом давлении прессования (100 МПа), влажности сырья (10%) и содержании древесных опилок (10 мас. %), но при разных температурах прессования. Указанные условия получения древесноугольных брикетов также были обнаружены опытным путем, результаты которых описаны в нашей работе [23].

На рис. 6 представлены результаты изменения K_1 и K_2 в зависимости от

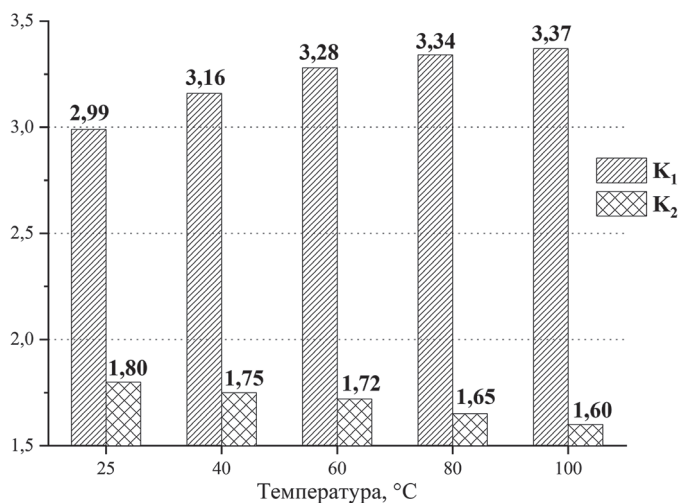


Рис. 6. Изменения коэффициента уплотнения (K_1) и коэффициента упругого расширения (K_2) древесно-угольных образцов в зависимости от повышения температуры

Fig. 6. Change in compaction factor K_1 and elastic expansion factor K_2 of coal-wood samples subject to increasing temperature

повышения температуры прессования. Как видно, при повышении температуры от 25 °C до 100 °C наблюдается увеличение коэффициента уплотнения и уменьшение коэффициента упругого

расширения, что указывает на увеличение доли пластических деформаций. Если рассматривать изменение прочности и плотности древесно-угольных образцов в идентичном температурном

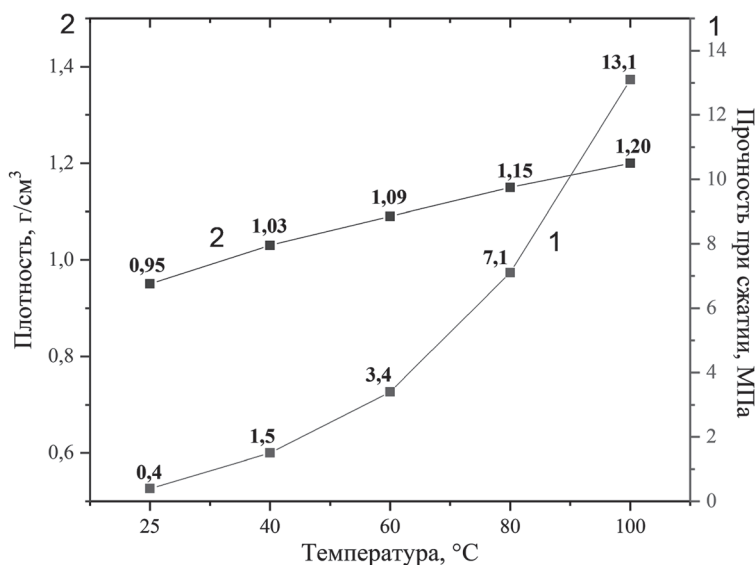


Рис. 7. Значения прочности при сжатии (линия 1) и плотности (линия 2) древесно-угольных образцов при различных температурах прессования

Fig. 7. Compressive strength (line 1) and density (line 2) of coal-wood samples in pressing under different temperatures

интервале, то мы также видим повышение данных показателей (рис. 7). Увеличение температуры прессования до 80–100 °С приводит к существенному повышению прочности при сжатии от 0,4 МПа до 7,1 и 13,1 МПа соответственно, что хорошо коррелируется с результатами исследования вязкоупругих свойств древесины. Именно при в указанном температурном интервале было выявлено уменьшение E' и повышение E'' , которые свидетельствуют о размягчении древесины. Изменение реологических свойств древесины при увеличении температуры, как видно из результатов физико-механических испытаний, приводит к улучшению ее связующих свойств.

Заключение

Исследование вязкоупругих свойств древесины методом динамического механического анализа показало, что в диапазоне температур 80–100 °С уменьшается упругость и повышается пластичность древесины. При этом на характер

изменения данных свойств существенное влияние оказывает содержание влаги, выполняющей функцию пластификатора. Данное качество полимерных компонентов древесины способствует использованию измельченной древесины как связующей добавки для получения брикетированного топлива на основе плотных зрелых бурых углей марок 2Б и 3Б, о чем свидетельствуют результаты физико-механического анализа древесно-угольных брикетов.

Авторы статьи выражают благодарность сотрудникам Байкальского института природопользования СО РАН д.х.н. Д.М. Могнонову, к.т.н. О.Ж. Аюровой за помощь в проведении динамического механического анализа древесины сосны, а также д.т.н., профессору, руководителю научно-учебной испытательной лаборатории «Физико-химии углей» НИТУ «МИСиС» С.А. Эпштейн за содействие в исследовании физико-химических свойств бурого угля Кангаласского месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батугина Н. С., Гаврилов В. Л., Ткач С. М. Принципы ресурсосберегающего управления качеством при поставках угля в труднодоступные районы Северо-Востока России // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2019. — Т. 24. — № 2. — С. 64–73. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-2-6.
2. Гаврилов В. Л. Иванов В. Г., Кугаевский А. А., Рахлеев П. Д. Состояние и перспективы добычи и потребления угля в центральных районах Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № S24. — С. 422–430. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-422-430.
3. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, vol. 82, pp. 477–487. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.072.
4. Olugbade T. O., Ojo O. T. Binderless briquetting technology for lignite briquettes: a review // Energy, Ecology and Environment. 2021, vol. 6, no. 1, pp. 69–79. DOI: 10.1007/s40974-020-00165-3.
5. Sun B., Yu J., Tahmasebi A., Han Y. An experimental study on binderless briquetting of Chinese lignite: Effects of briquetting conditions // Fuel Processing Technology. 2014, vol. 124, pp. 243–248. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.03.013.
6. Stelte W., Sanadi A. N., Shang L., Holm J. K., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. Recent developments in biomass pelletization. A review // BioResources. 2012, vol. 7, no. 3, pp. 4451–4490.

7. Kaliyan N., Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products // *Biomass and Bioenergy*. 2009, vol. 33, no. 3, pp. 337–359. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005.

8. Янковский С. А., Кузнецов Г. В. Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве // *Химия твердого топлива*. — 2019. — № 1. — С. 26–33. DOI: 10.1134/S0023117719010080.

9. Ремесников И. Д. Брикетирование угля. М.: Углетехиздат, 1957. 240 с.

10. Pietsch W. Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment. Weinheim: Wiley, 2002. 614 p.

11. Ферри Д. Вязкоупругие свойства полимеров. — М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. — 535 с.

12. Старцев О. В., Скурыдин Ю. Г., Скурыдина Е. М., Старцева Л. Т., Молоков М. В. Влияние условий баротермического гидролиза на температуру стеклования древесины дуба // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. — 2016. — № 2. — С. 15–21.

13. Menard K. P. Dynamic mechanical analysis: a practical introduction. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. 214 p.

14. Zhan T., Jiang J., Peng H., Lu J. Dynamic viscoelastic properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) during moisture desorption processes // *Holzforschung*. 2015, vol. 70, no. 6, pp. 547–555. DOI: 10.1515/hf-2015-0183.

15. ГОСТ 21289-2018 Брикеты угольные. Методы определения механической прочности [Электронный ресурс]. — М.: Стандартинформ, 2021. — 11 с. Доступ из справ.-правовой системы «Техэксперт».

16. Zhan T., Jiang J., Lu J., Zhang Y., Chang J. Influence of hygrothermal condition on dynamic viscoelasticity of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). Part 1: moisture adsorption // *Holzforschung*. 2018, vol. 72, no. 7, pp. 567–578. DOI: 10.1515/hf-2017-0129.

17. Zhan T., Jiang J., Lu J., Zhang Y., Chang J. Frequency-dependent viscoelastic properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) under hygrothermal conditions. Part 2: moisture desorption // *Holzforschung*. 2019, vol. 73, no. 8, pp. 737–746. DOI: 10.1515/hf-2018-0209.


18. Dufour A., Castro-Diaz M., Marchal P., Brosse N., Olcese R., Bouroukba M., Snape C. In situ analysis of biomass pyrolysis by high temperature rheology in relations with ¹H NMR // *Energy Fuels*. 2012, vol. 26, no. 10, pp. 6432–6441. DOI: 10.1021/ef301310x.

19. Anukam A. I., Berghel J., Famewo E. B., Frodeson S. Improving the understanding of the bonding mechanism of primary components of biomass pellets through the use of advanced analytical instruments // *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2020, vol. 40, no. 1, pp. 15–32. DOI: 10.1080/02773813.2019.1652324.

20. Wang S., Dai G., Yang H., Luo Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism. A state-of-the-art review // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017, vol. 62, pp. 33–86. DOI: 10.1016/j.pecc.2017.05.004.

21. Yang H., Yan R., Chen H., Lee D. H., Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis // *Fuel*. 2007, vol. 86, no. 12, pp. 1781–1788. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.

22. Kaliyan N., Morey R. V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass // *Bioresource Technology*. 2010, vol. 101, no. 3, pp. 1082–1090. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.064.

23. Попов С. Н., Буренина О. Н., Николаева Л. А., Соловьев Т. М. Получение и свойства древесно-угольных топливных брикетов // *Химия твердого топлива*. — 2018. — Т. 4. — № 4. — С. 69–72. DOI: 10.1134/S0023117718040096. 

REFERENCES

1. Batugina N. S., Gavrilov V. L., Tkach S. M. Principles of resource-saving management of quality for coal supply to the hard-to-reach regions of the north-east of Russia. *Arctic and*

Subarctic natural resources. 2019, vol. 24, no. 2, pp. 64–73. [In Russ]. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-2-6.

2. Gavrilov V. L., Ivanov V. G., Kugaevskiy A. A., Rahleev P. D. Current state and prospects of coal mining and consumption in central regions of Yakutia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. S24, pp. 422–430. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-422-430.

3. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, vol. 82, pp. 477–487. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.072.

4. Olugbade T. O., Ojo O. T. Binderless briquetting technology for lignite briquettes: a review. *Energy, Ecology and Environment*. 2021, vol. 6, no. 1, pp. 69–79. DOI: 10.1007/s40974-020-00165-3.

5. Sun B., Yu J., Tahmasebi A., Han Y. An experimental study on binderless briquetting of Chinese lignite: Effects of briquetting conditions. *Fuel Processing Technology*. 2014, vol. 124, pp. 243–248. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.03.013.

6. Stelte W., Sanadi A. N., Shang L., Holm J. K., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. Recent developments in biomass pelletization. A review. *BioResources*. 2012, vol. 7, no. 3, pp. 4451–4490.

7. Kaliyan N., Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*. 2009, vol. 33, no. 3, pp. 337–359. DOI: 10.1016/j.biombi-oe.2008.08.005.

8. Yankovskiy S. A., Kuznetsov G. V. Physicochemical transformations of mixed fuels based on typical coals and wood upon heating. *Khimiya tverdogo topliva*. 2019, no. 1, pp. 26–33. [In Russ]. DOI: 10.1134/S0023117719010080.

9. Remesnikov I. D. *Briketirovanie uglya* [Briquetting of coal], Moscow, Ugletekhizdat, 1957, 240 p.

10. Pietsch W. *Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment*. Weinheim: Wiley, 2002. 614 p.

11. Ferri D. *Vyazkoupругie svoystva polimerov* [Viscoelastic properties of polymers], Moscow, Izd-vo inostrannoy literatury, 1963, 535 p.

12. Startsev O. V., Skurydin YU. G., Skurydina E. M., Startseva L. T., Molokov M. V. The influence of barometric hydrolysis on the glass-transition temperature of oak timber. *Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik*. 2016, no. 2, pp. 15–21.

13. Menard K. P. *Dynamic mechanical analysis: a practical introduction*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2008. 214 p.

14. Zhan T., Jiang J., Peng H., Lu J. Dynamic viscoelastic properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) during moisture desorption processes. *Holzforschung*. 2015, vol. 70, no. 6, pp. 547–555. DOI: 10.1515/hf-2015-0183.

15. *Brikety ugol'nye. Metody opredeleniya mekhanicheskoy prochnosti GOST 21289-2018* [Coal briquettes. Methods for determination of mechanical strength State Standard 21289-2018], Moscow, Standarty [In Russ].

16. Zhan T., Jiang J., Lu J., Zhang Y., Chang J. Influence of hygrothermal condition on dynamic viscoelasticity of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*). Part 1: moisture adsorption. *Holzforschung*. 2018, vol. 72, no. 7, pp. 567–578. DOI: 10.1515/hf-2017-0129.

17. Zhan T., Jiang J., Lu J., Zhang Y., Chang J. Frequency-dependent viscoelastic properties of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) under hygrothermal conditions. Part 2: moisture desorption. *Holzforschung*. 2019, vol. 73, no. 8, pp. 737–746. DOI: 10.1515/hf-2018-0209.

18. Dufour A., Castro-Diaz M., Marchal P., Brosse N., Olcese R., Bouroukba M., Snape C. In situ analysis of biomass pyrolysis by high temperature rheology in relations with ¹H NMR. *Energy Fuels*. 2012, vol. 26, no. 10, pp. 6432–6441. DOI: 10.1021/ef301310x.

19. Anukam A. I., Berghel J., Famewo E. B., Frodeson S. Improving the understanding of the bonding mechanism of primary components of biomass pellets through the use of advanced ana-

lytical instruments. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2020, vol. 40, no. 1, pp. 15–32. DOI: 10.1080/02773813.2019.1652324.

20. Wang S., Dai G., Yang H., Luo Z. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism. A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2017, vol. 62, pp. 33–86. DOI: 10.1016/j.peccs.2017.05.004.

21. Yang H., Yan R., Chen H., Lee D. H., Zheng C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*. 2007, vol. 86, no. 12, pp. 1781–1788. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.

22. Kaliyan N., Morey R. V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*. 2010, vol. 101, no. 3, pp. 1082–1090. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.08.064.

23. Popov S. N., Burenina O. N., Nikolaeva L. A., Solov'ev T. M. Production and properties of wood–coal fuel briquettes. *Khimiya tverdogo topliva*. 2018, vol. 4, no. 4, pp. 69–72. [In Russ]. DOI: 10.1134/S0023117718040096.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Соловьев Тускул Михайлович*¹ – инженер,

e-mail: tuskulsolov'ev@yandex.ru,

*Буренина Ольга Николаевна*¹ – канд. техн. наук,

зав. лабораторией композиционных строительных материалов,

Заровняев Борис Николаевич – д-р техн. наук, профессор,

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,

*Николаева Лира Александровна*¹ – канд. техн. наук,

старший научный сотрудник,

¹ Институт проблем нефти и газа СО РАН.

Для контактов: Соловьев Т.М., e-mail: tuskulsolov'ev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*T.M. Solov'ev*¹, Engineer,

e-mail: tuskulsolov'ev@yandex.ru,

*O.N. Burenina*¹, Cand. Sci. (Eng.),

Head of Laboratory of Composite Construction Materials,

B.N. Zarovnjaev, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,

677000, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia,

*L.A. Nikolaeva*¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,

¹ Institute of Oil and Gases Problems

of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,

677007, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia.

Corresponding author: T.M. Solov'ev, e-mail: tuskulsolov'ev@yandex.ru.

Получена редакцией 24.06.2021; получена после рецензии 17.07.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 24.06.2021; received after the review 17.07.2021; accepted for printing 10.10.2021.

