

УДК 674.81

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ГРАНУЛИРОВАНИЯ И СОСТАВА ТОПЛИВНЫХ ПЕЛЛЕТ НА ИХ ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

Н.А. СЫЧЕВА, *асп. БГТУ*⁽¹⁾,И.А. ХМЫЗОВ, *доц., БГТУ, канд. техн. наук*⁽¹⁾,Т.В. СОЛОВЬЕВА, *проф., БГТУ, д-р техн. наук*⁽¹⁾*natalka_wow@mail.ru, hmyzov@belstu.by, soloueva@belstu.by*⁽¹⁾ Белорусский государственный технологический университет (БГТУ)
220050 Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова, 13-а

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния режима гранулирования (температуры и давления) на прочностные свойства топливных пеллет, полученных из древесины сосны, ольхи черной, ольхи серой и березы. Проведен сравнительный анализ компонентного состава древесины хвойных и лиственных пород. Сделан предварительный вывод о взаимном усилении влияния на прочность пеллет совместного сочетания древесины хвойных и лиственных пород. В результате реализации симплекс-решетчатого плана Шеффе и решенной на его основе задачи оптимизации установлен оптимальный породный состав древесины для производства пеллет с повышенной прочностью.

Ключевые слова: топливные пеллеты, механическая прочность, температура, давление, древесина хвойных и лиственных пород.

В условиях истощения природных ресурсов и постоянно возрастающих цен на традиционные энергоносители актуальным является решение проблемы поиска альтернативных источников энергии. В связи с этим в настоящее время большое внимание уделяется разработке технологий производства биотоплива на основе отходов древесины. Особый интерес к использованию древесной биомассы возрастает и вследствие ее высокой экологичности. Древесное топливо практически не содержит серы и имеет высокую реакционную способность, поэтому в дымовых газах при его сжигании не содержится сернистого и серного газа, а содержание оксида углерода при рационально сконструированных топочных устройствах минимально [1]. Повышенным спросом среди различных видов древесного топлива пользуются пеллеты (гранулы), потребительские свойства которых обладают высокой конкурентоспособностью по сравнению с другими видами топлива.

Древесные пеллеты – это изделия цилиндрической формы, спрессованные методом экструзии из высушенного, предварительно измельченного древесного сырья. Преимуществом использования прессованного биотоплива в виде пеллет является их большая теплотворная способность по сравнению со щепой и кусковыми отходами дре-

весины. Цены на древесные пеллеты значительно ниже цен на другие традиционные виды топлива, при сопоставимых потребительских свойствах.

Востребованность пеллет в больших объемах, особенно на внешнем рынке, привела к необходимости анализа сырьевой базы для увеличения объемов их производства.

Республика Беларусь обладает значительными лесными ресурсами – 804,4 тыс. га. Удельный вес хвойных пород в общем запасе древесины составляет 69 %, при этом основной лесообразующей породой лесов Беларуси является сосна. Она занимает 56 % покрытой лесами площади. Значительную часть площади лесного фонда занимают мягколиственные породы. Их доля в общей лесопокрытой площади – 31 %. Распределение общего запаса насаждений по группам основных пород и площади лесных насаждений по основным лесообразующим породам представлено на рис. 1 [2].

В результате широкого использования древесины сосны в деревообрабатывающей промышленности образуются отходы, которые полностью перерабатываются, в том числе и в топливные пеллеты. Однако, учитывая высокий спрос на пеллеты, возникает проблема дефицита сырья для их производства в условиях сокращения ресурсов древесины

Теплотворная способность древесины [3]

The calorific value of wood [3]

Порода древесины	Теплотворная способность, МДж/кг	
	Ствол	Целое дерево
Сосна обыкновенная (<i>Pinus Sylvestris</i>)	19,31	19,52
Ольха черная (<i>Alnus glutinosa</i>)	18,89	19,31
Ольха серая (<i>Alnus incana</i>)	18,67	19,18
Береза (<i>Betula pendula</i>)	18,61	19,29

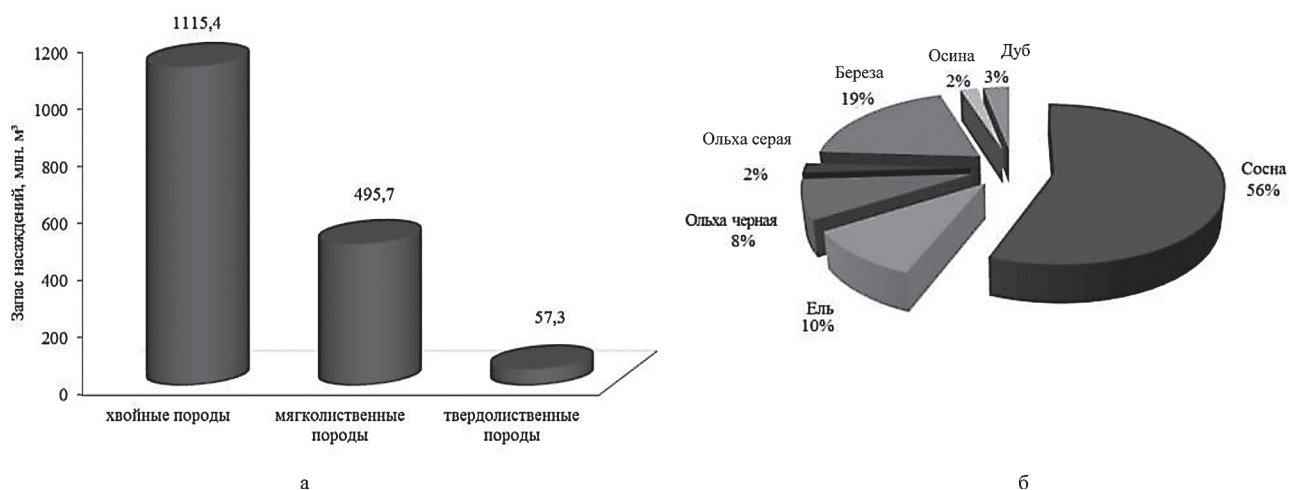


Рис. 1. Распределение общего запаса насаждений по группам основных пород (а) и площади лесных насаждений по основным лесообразующим породам (б)

Fig. 1. The distribution of the total stock of forests by groups of basic species (a) and the area of forest plantations for the main forest-forming species (b)

сосны и ее дороговизны. Это вызывает необходимость проведения работ в расширении сырьевой базы для производства топливных пеллет за счет использования малоценных насаждений мягколиственных пород древесины, таких как береза, ольха черная и ольха серая, которые являются быстрорастущими деревьями, но в значительной части все еще не находят удовлетворительного практического применения. Исходя из данных о теплотворной способности этих пород древесины, представленных в табл. 1, можно говорить об их высокой энергетической ценности, что предопределяет необходимость их эффективного использования в производстве топливных пеллет.

Качество топливных пеллет зависит от многих факторов, среди которых можно выделить следующие: влажность, зольность, породный и фракционный состав исходного древесного сырья, технологические факторы получения пеллет [3]. Одним из важных

показателей качества пеллет является их механическая прочность, так как при хранении и транспортировке пеллет нижние слои испытывают высокое давление и крошатся, образуя пылевидную фракцию, что приводит к ухудшению внешнего вида пеллет и их свойств как топлива – снижению энергоэффективности. Поэтому в настоящих исследованиях основное внимание было направлено на установление влияния технологических факторов производства и состава композиции пеллет на их прочностные свойства. Наиболее информативными показателями, характеризующими прочностные свойства пеллет, являются предел прочности при сжатии и устойчивость к вибрации.

В лабораторных условиях кафедры химической переработки древесины БГТУ получали образцы топливных пеллет из древесины березы, ольхи черной и серой. Образцы сравнения изготавливали из традиционно используемой древесины сосны.

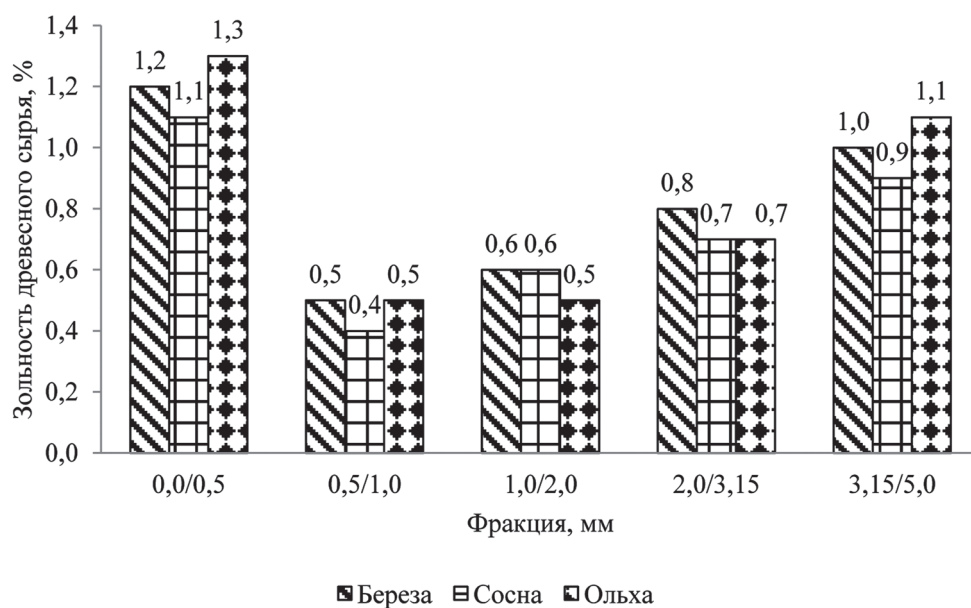


Рис. 2. Влияние фракционного состава сырья на зольность pellets
Fig. 2. The influence of the fractional composition of raw materials on the ash content of pellets

Перед составлением композиции pellets измельченные древесные частицы фракционировали и определяли зольность каждой фракции с целью установления кондиционной фракции исходного сырья. Результаты влияния различных фракций измельченных древесных частиц сосны, ольхи и березы на зольность pellets представлены на рис. 2.

Из диаграммы на рис. 2 видно, что самую высокую зольность древесных частиц – 1,2 % у березы, 1,1 % у сосны и 1,3 % у ольхи – имеют pellets, полученные из фракции 0,0/0,5. Наименьшую зольность – 0,5 % у березы, 0,4 % у сосны и 0,5 % у ольхи – имеют pellets, полученные из фракции 0,5/1,0. Это можно объяснить различным содержанием высокзолных частиц в указанных фракциях в зависимости от состояния ножей, режима переработки и свойств древесного сырья. Установили, что кондиционными являются фракции 0,5/1,0 и 1,0/2,0, свободные от мелкодисперсных частиц, которые являются высокзолными.

При получении pellets технологические параметры исходного древесного сырья поддерживали в следующих диапазонах значений: влажность – от 8 до 11 %, зольность – от 0,5 до 0,6 %; размер древесных частиц – от 0,5 до 2,0 мм.

Как известно, на механическую прочность pellets значительное влияние оказывают давление и температура прессования. Графические зависимости влияния этих параметров процесса на механическую прочность топливных pellets, полученных из древесины сосны, березы, ольхи черной и серой, представлены на рис. 3 и 4.

Из рис. 3 видно, что для древесины сосны, ольхи и березы повышение температуры прессования от 100 до 125°C приводит к существенному увеличению прочности. В этом интервале температур происходит пластифицирование высокореакционных компонентов древесины, таких как лигнин и гемицеллюлозы, которые приобретают свойства связующего, обеспечивающего адгезию древесных частиц друг к другу. Дальнейшее повышение температуры прессования нецелесообразно, т.к. значения предела прочности при сжатии практически не изменяются, а далее при достижении 130°C наблюдается некоторое их снижение для всех исследуемых пород древесины, вероятно, под действием начинающихся деструктивных процессов.

Для получения pellets высокого качества необходимо обеспечить достаточное уплотнение древесных частиц, из которых они состоят. Это обеспечивается давлением, со-

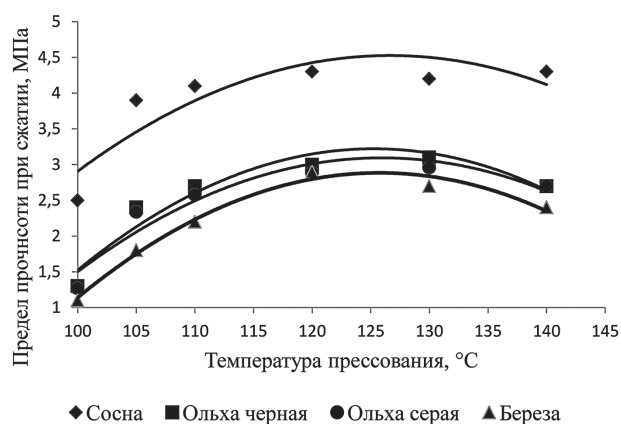


Рис. 3. Влияние температуры прессования на предел прочности при сжатии пеллет

Fig. 3. The influence of pressing temperature on the compressive strength of pellets

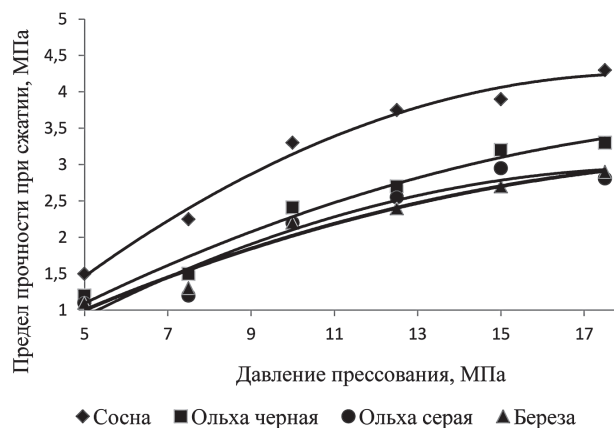


Рис. 4. Влияние давления прессования на предел прочности при сжатии пеллет

Fig. 4. The influence of pressing on the compressive strength of pellets

здаваемым прессующими вальцами в пресс-грануляторе.

Как видно из полученных данных, увеличение давления прессования от 5 до 15 МПа закономерно приводит к увеличению прочности при сжатии пеллет от 1,1 до 4,3 МПа. Это является следствием снижения пористости материала, сопровождающегося увеличением удельной поверхности контактов между частицами древесного наполнителя. Увеличение давления свыше 13 МПа для сосны и 15 МПа для ольхи и березы нецелесообразно, так как прирост прочности становится сравнительно незначительным.

Проведенные исследования по установлению влияния температуры и давления

прессования пеллет на их прочность имеют идентичный характер для древесины сосны, ольхи и березы. Это предопределяет интерес к комбинированию древесины различных пород при производстве пеллет. Перед проведением исследований в данном направлении была установлена устойчивость пеллет, полученных из этих древесных пород, к вибрации. Этот прием позволил смоделировать процесс транспортировки пеллет на дальние расстояния.

Исследования влияния вибрации на устойчивость пеллет к истиранию проводили с использованием специальной просеивающей машины (HAVER EML 200 digital plus), которая представляет собой комплект сит с размерами ячеек 5 мм, 3 мм, 2 мм, 1 мм, 0,5 мм, 0,25 мм, закрепленных на вибрационном корпусе. Просеивающая машина оснащена автоматической системой управления амплитудой и продолжительностью вибрационного воздействия, что позволило регулировать режимные параметры. На верхнее сито загружали навеску пеллет и подвергали их вибрации с амплитудой 3 мм продолжительностью 7 мин. По истечении времени воздействия вибрации взвешивали оставшиеся части пеллет на каждом из сит и определяли долю фракций. Результаты исследований представлены на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что наиболее устойчивы к вибрации пеллеты, полученные из древесины сосны, доля пылевидной фрак-

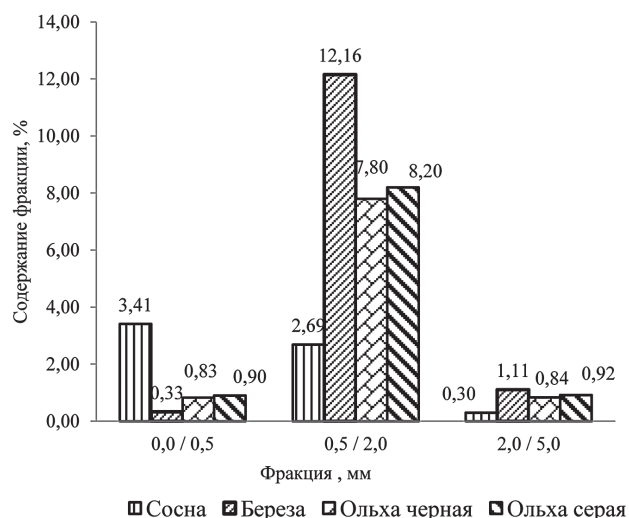


Рис. 5. Устойчивость пеллет к вибрации

Fig. 5. The vibration resistance of pellets

**Влияние соотношения пород древесины в композиции
на предел прочности при сжатии пеллет**
The influence of wood species ratio in the composition on the compressive strength of pellets

№ опыта	Соотношение пород древесины в композиции пеллет, %			Предел прочности при сжатии пеллет, МПа
	Сосна	Береза	Ольха	
1	100	0	0	4,30
2	0	100	0	2,90
3	0	0	100	3,20
4	50	50	0	2,70
5	50	0	50	4,02
6	0	50	50	3,40
7	75	25	0	2,90
8	25	75	0	1,90
9	75	0	25	4,07
10	25	0	75	4,00
11	0	75	25	1,74
12	0	25	75	3,80
13	50	25	25	3,57
14	25	50	25	3,55
15	25	25	50	4,26

ции составила 6,4 %. При этом для пеллет, полученных из березы, ольхи черной и ольхи серой – 13,6, 9,5 и 10,0 % соответственно. Пеллеты из лиственных пород древесины несколько уступают по виброустойчивости пеллетам, полученным из сосны, вероятно в силу различий химического состава и анатомического строения хвойных и лиственных пород древесины.

Поэтому особый интерес представляет анализ влияния химического состава по основным компонентам древесины на механическую прочность пеллет.

Химический состав лиственной и хвойной древесины различается по содержанию и свойствам этих основных компонентов. В древесине хвойных пород лигнин в среднем содержится от 27 до 33 %, в древесине же лиственных пород меньше – от 17 до 26 % [4, 5]. Он расположен в межклеточном пространстве древесины, поэтому участвует в межволоконных взаимодействиях, необходимых для связывания древесных волокон. Этот процесс протекает и при образовании пеллет. Лиственный лигнин по строению элементарных звеньев и степени полимеризации отличается от хвойного. Вследствие значительной

доли сингилпропановых единиц лигнин древесины лиственных пород имеет разветвленную структуру и практически не проявляет способности к реакциям поликонденсации в условиях гранулирования пеллет [6]. В то же время для гемицеллюлоз лиственных пород характерна низкотемпературная деструкция с образованием новых функциональных групп (гидроксильных и карбонильных) [7], роль которых при образовании пеллет весьма вероятна. Благодаря присутствию в лиственной древесине большего количества гемицеллюлоз по сравнению с хвойными породами (25–35 % и 17–22 % соответственно [8]) в температурном диапазоне 120–130°C они приобретают свойства связующего, обеспечивающего адгезионное взаимодействие древесных частиц с приданием пеллетам формоустойчивости.

Исходя из различий в химическом строении древесины лиственных и хвойных пород можно было ожидать взаимного усиления влияния на прочность пеллет при совместном их сочетании. Это нашло экспериментальное подтверждение в выполненных нами исследованиях, которые позволили установить оптимальный композиционный

Показатели качества топливных пеллет
Quality indicators of fuel pellet

Наименование показателя	Образцы пеллет, полученные из индивидуальных пород древесины			Оптимальный породный состав пеллет, состоящий из древесины сосны 35 %, березы 23 %, ольхи 42 %
	сосны	березы	ольхи	
Влажность, %	7,9	7,5	6,8	6,3
Зольность, %	0,50	0,52	0,54	0,50
Плотность, кг/м ³	1170	1130	1155	1220
Предел прочности при сжатии, МПа	4,3	2,9	3,2	4,3
Теплотворная способность, МДж/кг	18,4	18,5	17,5	18,4

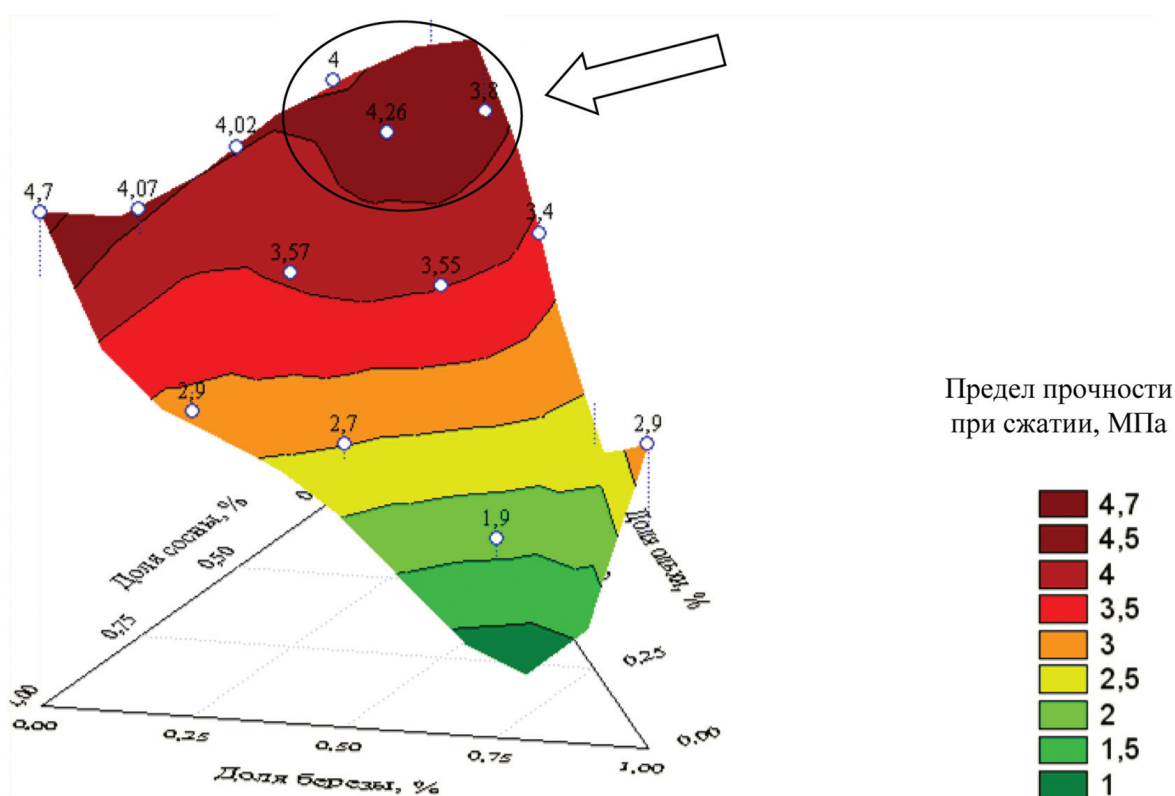


Рис. 6. Зависимость предела прочности при сжатии пеллет от их породного состава
Fig. 6. Dependence of pellets compressive strength on their species composition

состав пеллет из древесины сосны, ольхи и березы. Был реализован симплекс-решетчатый план Шеффе 4-го порядка для трех компонентов [9, 10]. Массовую долю сосны, березы и ольхи в композиции пеллет варьировали от 0 до 100 % (или в долях – от 0 до 1). Результаты исследований приведены в табл. 2.

На основании результатов исследований с применением программы STATISTICA

было получено адекватное уравнение регрессии, характеризующее степень влияния каждой породы древесины и их попарного сочетания на показатель предела прочности при сжатии пеллет.

С использованием полученного уравнения регрессии была построена поверхность отклика, которая представлена на рис. 6. Точки, расположенные в вершинах факторного пространства, соответствуют значениям

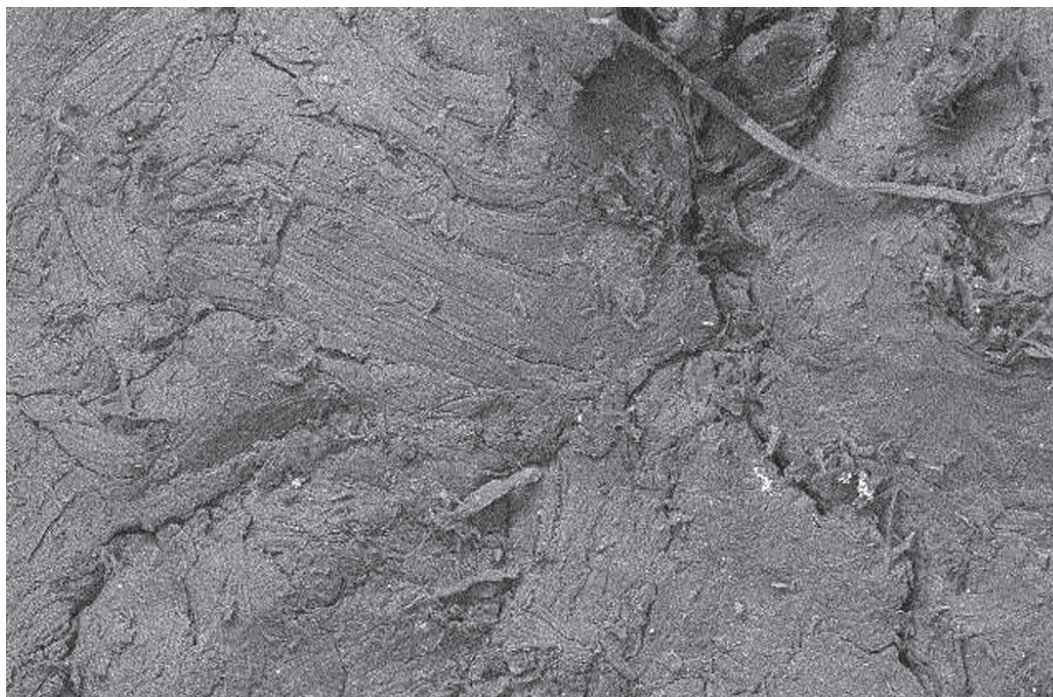


Рис. 7. Электронно-микроскопическая фотография поверхности pellets, полученных с использованием установленного оптимального породного состава

Fig. 7. An electron microscopic photograph of the surface of pellets produced by using the optimum species composition

предела прочности при сжатии pellets, полученных только из древесины сосны, ольхи или березы; точки, расположенные на гранях, отражают значение прочности pellets из попарно сочетаемых пород древесины, а внутри находятся точки, характеризующие прочность pellets, содержащих все три породы древесины.

Из рис. 4 видно, что наиболее высокие значения показателя предела прочности при сжатии pellets 4,0–4,5 МПа достигаются при содержании в диапазонах композиции pellets: древесины сосны 15–35 %, березы 20–40 % и ольхи от 30–65 %.

В результате решения поставленной задачи оптимизации установили, что оптимальным породным составом для производства pellets является следующее содержание компонентов: сосны – 35 %, березы – 23 % и ольхи – 42 %. Показатели качества pellets, полученных с использованием оптимального соотношения компонентов породного состава сырья в сравнении с индивидуальными породами древесины сосны, ольхи и березы, представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что pellets, полученные с использованием оптимального породного состава, превосходят по прочности и плотности pellets из древесины ольхи и березы и соответствуют качеству pellets, полученных из древесины сосны (при сопоставимых значениях влажности и зольности). Результаты исследований позволяют подтвердить наличие взаимного усиления влияния исследуемых пород древесины на качество pellets, т.е. наличие эффекта синергизма.

Электронно-микроскопическая фотография структуры поверхности pellets с использованием установленного оптимального породного состава, полученная на электронном микроскопе JSM 5610 LV (Япония) при увеличении в 50 раз, представлена на рис. 7.

Из приведенного изображения видно, что pellets, полученные с использованием установленного оптимального породного состава, имеют довольно плотную упаковку древесных частиц, что и предопределяет повышение их прочности до значений, сопоста-

вимых с пеллетами, полученными из древесины сосны.

На основании проведенных исследований можно сделать заключение о целесообразности комбинирования древесины хвойных и лиственных пород при производстве пеллет с достижением их высоких прочностных свойств.

Библиографический список

1. Головкин, С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С.И. Головкин, И.Ф. Коперин, В. И. Найденов. – М.: Лесная пром-сть, 1987. – 224 с.
2. Вавилов, А.В. Пеллеты в Беларуси: производство и получение энергии: монография / А.В. Вавилов. – Минск: Стринко, 2012. – 147 с.
3. Назаров, В.И. Особенности разработки процесса прессового гранулирования биотоплива на основе древесных и растительных отходов / И.А. Булатов, Д.А. Макаренко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – №2. – С. 35–39.
4. Атрохин, В.Г. Древесные породы мира: в 3 т. / В.Г. Атрохин, К.К. Калущий, Ф.Т. Тюрников. – М.: Лесная пром-сть, 1982. – Т. 3. – 264 с.
5. Азаров, В.И. Химия древесины и синтетических полимеров: учеб. пособие / В.И. Азаров, А.В. Буров, А.В. Оболенская. – СПб.: СПбЛТА, 1999. – 628 с.
6. Соловьева, Т.В. Превращение компонентов лигноуглеводной матрицы в технологии древесноволокнистых плит: дис...д-ра. техн. наук / Т.В. Соловьева. – Минск, 1998 – 259 с.
7. Скриган, А.И. Процессы превращения древесины и ее химическая переработка / А.И. Скриган. – Минск: Наука и техника, 1981. – 206 с.
8. Никитин, Н.И. Химия древесины и целлюлозы / Н.И. Никитин. – М.-Л.: Издательство Академии наук СССР, 1962. – 711 с.
9. Пен, Р.З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства / Р.З. Пен. – Красноярск: Красноярский гос. ун-т, 1982. – 192 с.
10. Колесников, В.Л. Компьютерное моделирование и оптимизация химико-технологических систем: учеб. пособие для химико-технологических специальностей вузов / В.Л. Колесников, И.М. Жарский, П.П. Урбанович. – Минск: БГТУ, 2004. – 533 с.

THE INFLUENCE OF GRANULATION AND PELLETS COMPOSITION ON THEIR STRENGTH PROPERTIES

Sychova N.A., pg. BGTU ⁽¹⁾; Hmyzov I.A., Assoc. Prof. BGTU, Ph.D. (Tech)⁽¹⁾; Soloueva T.V., Prof. BGTU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾

natalka_wow@mail.ru, hmyzov@belstu.by, soloueva@belstu.by

⁽¹⁾Belarusian State Technological University (BGTU), 220050 Republic of Belarus, Minsk, st. Sverdlov, 13a

The paper presents the results of experimental research concerning the influence of granulation (temperature and pressure) on the strength properties of pellets from pine, black alder, gray alder and birch. A comparative analysis of the structure of softwood and hardwood has been completed. A preliminary conclusion concerning the enhancement of mutual influence of softwood and hardwood combination on the strength of pellets was made. As a result of the simplex lattice plan by Scheffe and the solutions based on it, the problem of optimizing the species composition to obtain the optimal wood species combination for the production of pellets with high strength has been settled.

Keywords: fuel pellets, mechanical strength, temperature, pressure, softwood and hardwood.

References

1. Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydenov V.I. *Energeticheskoe ispol'zovanie drevesnykh otkhodov* [Energy use of wood waste] Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1987, 224 p.
2. Vavilov A.V. *Pellety v Belarusi: proizvodstvo i poluchenie energii* [Pellets in Belarus: the production and reception of energy]: monografiya, Minsk: Strinko, 2012, 147 p.
3. Nazarov V.I. *Osobennosti razrabotki protsessy pressovogo granulirovaniya biotopliva na osnove drevesnykh i rastitel'nykh otkhodov* [Features of the development of press granulation process of biofuels based on wood and plant waste] *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering], 2009. no 2, pp. 35–39.
4. Atrokhin V.G., Kalutskiy K.K., Tyurikov F.T. *Drevesnye porody mira* [Timbers world] Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1982, T 3: *Drevesnye porody SSSR* [Timbers USSR], 264 p.
5. Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Wood chemistry and synthetic polymers]. SPb.: SPbLTA, 1999, 628 p.
6. Solov'eva T.V. *Prevrashchenie komponentov lignouglevodnoy matritsy v tekhnologii drevesnovoloknistykh plit* [The transformation matrix components lignouglevodnyh technology fibreboard]: dis...d-ra. tekhn. nauk, Minsk, 1998, 259 p.
7. Skrigan A.I. *Protssesy prevrashcheniya drevesiny i ee khimicheskaya pererabotka* [The process of wood transformation and its chemical processing] Minsk, Nauka i tekhnika, 1981, 206 p.
8. Nikitin N.I. *Khimiya drevesiny i tsellyulozy* [Chemistry of wood and cellulose]. Moscow, Leningrad: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1962, 711 p.
9. Pen R.Z. *Statisticheskie metody modelirovaniya i optimizatsii protsessov tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Statistical methods of modeling and optimization of processes of pulp and paper production]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy gos. un-t, 1982, 192 p.
10. Kolesnikov V.L., Zharskiy I.M., Urbanovich P.P. *Komp'yuternoe modelirovanie i optimizatsiya khimiko-tekhnologicheskikh sistem* [Computer simulation and optimization of chemical processes]. Minsk: BGTU, 2004, 533 p.