

УДК 676.153:62-493

Е. В. Дубоделова<sup>1</sup>, С. И. Шпак<sup>1</sup>, П. И. Письменский<sup>2</sup>, Т. В. Соловьева<sup>1</sup><sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>УП «БР-Консалт»**ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МАССА ИЗ ЩЕПЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
В КОМПОЗИЦИИ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД**

Доказана возможность совместного использования хвойной и лиственной древесины, характеризующихся неоднородностью свойств, для получения термомеханической массы. Установлено, что применение активирующей добавки – сульфита натрия в количестве 1,0% позволяет использовать древесину березы (*Betula verrucosa Ehrh.*) в композиции с древесиной ели (*Picea abies Karst*) в количестве до 20%. При этом достигается сравнимый с еловой термомеханической массой комплекс бумагообразующих свойств, а также несколько повышаются оптические и печатные свойства бумаги, полученной на ее основе. Это обусловлено протеканием в процессе термогидролитической обработки в присутствии сульфита натрия физико-химических процессов, связанных с гидролитической деструкцией лигноуглеводного комплекса древесины и формированием более сомкнутой структуры бумажного листа.

**Ключевые слова:** термомеханическая масса, композиция, сульфит натрия, древесина березы, древесина ели, математическое моделирование, оптимизация, бумагообразующие свойства, оптические свойства, печатные свойства.

E. V. Dubodelova<sup>1</sup>, S. I. Shpak<sup>1</sup>, P. I. Pis'menskiy<sup>2</sup>, T. V. Solov'yeva<sup>1</sup><sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>UE "BR-Consult"**THERMOMECHANICAL MASS FROM A CHIP WITH USE  
IN THE COMPOSITION OF WOOD OF LARGE BREEDS**

The possibility of joint use of softwood and hardwood, characterized by heterogeneity of the in properties, to obtain a thermomechanical pulp has been proved. It has been established that the use of an activating additive, sodium sulfite in quantity 1.0%, makes it possible to use birch wood (*Betula verrucosa Ehrh.*) In a composition with spruce wood (*Picea abies Karst*) in an amount up to 20%. At the same time, a complex of paper-forming properties comparable to that of thermomechanical pulp is achieved, and the optical and printing properties of paper obtained on its basis are slightly increased. This is due to the occurrence in the process of thermohydrolytic treatment in the presence of sodium sulfite of physico-chemical processes associated with the hydrolytic destruction of the lignohydrate complex of wood and the formation of a more closed structure of the paper.

**Key words:** thermomechanical mass, composition, sodium sulfite, birch wood, spruce wood, mathematical modeling, optimization, paper-forming properties, optical properties, printing properties.

Введение. В настоящее время рынок первичных волокнистых полуфабрикатов, к которым относится целлюлоза и древесная масса, согласно данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), является стабильным (объем производства в 2017 г. составил 184 млн т) и характеризуется положительной динамикой как производства (прирост за 2016–2017 г. составил 1%), так и экспорта (прирост 3% за аналогичный период) [1]. При этом коэффициент рекуперирования в целлюлозно-бумажной промышленности остается значительным и составляет порядка 55%. Данное обстоятельство объясняется схожими тенденциями производства (объем производства составляет порядка 400 млн/год) и потребления бумаги и картона в мире за последние 8 лет [1–3]. Структуру производимой

продукции характеризуют следующие основные товарные группы, расположенные в порядке убывания объемов их производства: тароупаковочная продукция, печатная и писчая, бытовая и гигиеническая, газетная бумага. При этом за последние годы для такой категории, как бумага для полиграфии (газетная, печатная и писчая) наблюдалось снижение производства, однако она остается основной и ее доля в структуре составляет около 30% [1–3]. Все указанные товарные группы требуют использования первичных волокнистых полуфабрикатов, которые должны характеризоваться не только определенным комплексом бумагообразующих, оптических и печатных свойств, но и показателей, свидетельствующих о безопасности и рентабельности бумажно-картонного производства. В связи с вышесказанным, несмотря на очевид-

ные достоинства целлюлозы, древесная масса является более конкурентоспособным первичным волокнистым полуфабрикатом, так как характеризуется низкой энергоемкостью и стоимостью, высоким выходом по отношению к древесине (80–95%) при минимальном количестве образуемых отходов и выбросов. Как и отмечено в работе [4], основными поставщиками оборудования комплексных технологических линий по производству современных видов древесной массы из щепы (термомеханическая (ТММ), химико-термомеханическая (ХТММ) и их модификации) в Евразийском экономическом Союзе остаются две крупные компании – Andritz (Австрия) и Metso Paper (Финляндия).

Согласно перечню ИТС 1-2015 «Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона», на территории Республики Беларусь в настоящее время реализованы две наилучшие доступные технологии производства древесной массы. Первая линия по производству ТММ методом RTS компании Andritz для газетной бумаги мощностью 40 000 т/год функционирует на РУП «Завод газетной бумаги» (г. Шклов), вторая предполагает производство беленой ХТММ для получения полиграфического мелованного и немелованного трехслойного картона с использованием оборудования Andritz мощностью 200 000 т/год на Добрушской бумажной фабрике «Герой труда» ОАО «Управляющая компания холдинга «Белорусские обои». Выпуск ТММ для газетной бумаги ориентирован на использование древесины ели, ХТММ для полиграфического картона – на рассеяннососудистые лиственные породы (береза и осина). По данным концерна «Беллесбумпром», существенный вклад в выполнение параметров социально-экономического развития лесопромышленного комплекса, определенных на 2018 г., вносила экономия затрат, реализуемая в том числе за счет комплексного использования древесных ресурсов. При этом, по-нашему мне-

нию, необходимо учитывать состояние и тенденции в лесном фонде страны. Согласно Государственному лесному кадастру Республики Беларусь, по состоянию на 1 января 2018 г. общий запас насаждений составил 1796,0 млн м<sup>3</sup>, лесистость территории республики – 39,8%, что выше среднемирового уровня. В то же время породный состав лесов страны не отличается большим разнообразием (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что преобладающими породами в структуре лесов Республики Беларусь являются сосна – 50,3%, береза – 23,2%, ель и ольха черная – 9,2 и 8,5% соответственно [5]. При этом основными потребляемыми лесопромышленным комплексом древесными породами выступают хвойные, такие как сосна и ель, в мебельном производстве востребована древесина дуба. В то же время, как видно из табл. 1, наблюдается тенденция уменьшения запасов древесины наиболее ценных пород. Доля сосны и дуба в общей структуре лесов снизилась за 10 лет на величину 0,1%, доля ели – на 0,2%. За этот же период в лесном фонде республики от воздействия природно-климатических факторов в среднем ежегодно погибало 14 тыс. га лесных насаждений. Неблагоприятные погодные условия были основной причиной гибели лесов. В 2016 г. общая площадь погибших насаждений была в три раза больше, чем среднее значение за предыдущие десять лет. В 2017 г. площадь погибших насаждений была максимальной за весь период ведения мониторинга и составила 35,4 тыс. га. Более 90% всей площади погибших лесов составили насаждения, погибшие от воздействия стволовых вредителей. При этом чаще от их воздействия гибли именно сосновые и еловые насаждения. Усыхание еловых лесов вызвано в основном воздействием короедатипографа, сосновых лесов – воздействием вершинного короеда. Кроме того, болезнями поражено 29% всех растущих еловых деревьев, имевших какие-либо видимые повреждения [6].

Таблица 1

**Породная структура лесов Республики Беларусь**

Древесная порода	Процент породы в общей структуре лесов, %	
	2006 г.	2017 г.
Преобладающие хвойные породы		
Сосна ( <i>Pinus sylvestris</i> L.)	50,4	50,3
Ель ( <i>Picea abies</i> Karst)	9,4	9,2
Преобладающие лиственные породы		
Береза ( <i>Betula verrucosa</i> Ehrh.)	22,4	23,2
Ольха черная ( <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn)	8,5	8,5
Дуб ( <i>Quercus Robur</i> L.)	3,5	3,4
Осина ( <i>Populus tremulae</i> L.)	2,0	2,1
Прочие хвойные и лиственные породы		
Прочие породы	3,3	3,3

По рассеянносудистым лиственным породам наблюдается прирост запасов древесины (табл. 1). При этом фактическая гибель деревьев находится в пределах среднестатистического значения [6]. В связи с вышесказанным актуальны работы по расширению сырьевой базы для производства первичных волокнистых полуфабрикатов в виде ТММ за счет использования древесины лиственных пород.

**Основная часть.** Рекомендуются породами для производства ТММ являются древесина ели (*Picea abies* Karst) и пихты сибирской (*Abies sibirica*) и их смеси, обеспечивающие требуемый уровень качества прежде всего по физико-механическим показателям. Лиственные породы древесины, по сравнению с хвойными, такой уровень не обеспечивают, так как имеют меньшее количество механических волокон, характеризующихся небольшой длиной и тонкостенностью; содержат много гемицеллюлоз и меньше целлюлозы, их ткани отличаются трубчатый строением. Это накладывает отпечаток на формирование комплекса бумагообразующих, оптических и печатных свойств ТММ из древесины лиственных пород. По-нашему мнению, исходя из особенностей RTS-метода, заключающихся в кратковременной (10–20 с) гидротермической обработке щепы при температуре 160°C и последующем высокочастотном ее размоле под давлением 0,5–0,6 МПа в рафинере первой ступени при скорости вращения дисков 2500–3000 об/мин, появляется возможность совместного использования древесины ели и рассеянносудистых лиственных пород. В доказательство выдвинутому предположению можно привести тот факт, что среди основных достоинств RTS-метода в ИТС 1-2015 отмечена оптимизация степени размягчения лигнина, позволяющая увеличить степень фибрилляции и поверхность волокон при размоле, а также повышение прочностных показателей продукции.

Целью проведенных настоящих исследований являлось формирование физико-механических показателей ТММ с использованием в композиции древесины лиственных пород и анализ оптических и печатных свойств, получаемых на ее основе бумаг.

В качестве лиственной породы была выбрана древесина березы (*Betula verrucosa* Ehrh.), характеризующаяся максимальным запасом в Республике Беларусь (табл. 1). В отличие от широко применяемых мировыми производителями лиственных и хвойных пород, ей присуща самая высокая плотность. Известно, что в производстве древесной массы предпочтение следует отдавать породам древесины с низкой плотностью, обладающим более тонкими стенками волокон, которые легче приобретают гибкость

и пластичность посредством поглощения энергии. Однако древесина березы характеризуется повышенной плотностью (в среднем 650 кг/м<sup>3</sup>), что обеспечивает ей повышенный уровень физико-механических показателей при равномерном распределении анатомических элементов в структуре, низкой склонностью к гниению и содержанию экстрактивных веществ [7–10]. Для исследования возможности использования смесей древесных пород, характеризующихся неоднородностью свойств, был задействован прием химического активирования древесины перед размолом с использованием высокорекрационного сульфита натрия по отношению как к хвойной, так и лиственной древесине, (ГОСТ 5644) [11, 12].

Получение ТММ является трехстадийным процессом. Моделирование каждой стадии в лабораторных условиях представлено в табл. 2.

Организационной основой для математического описания и оптимизации технологического процесса получения ТММ являлся многофакторный ортогональный, близкий к *D*-оптимальному, план эксперимента Коно [13]. Он позволяет при минимальном количестве определений получить достаточно полную информацию о значениях показателей в исследуемом факторном пространстве. Факторы, которые были приняты в качестве независимых переменных: температура гидротермической обработки щепы ( $x_1$ , °C); расход сульфита натрия ( $x_2$ , % к абсолютно сухой древесине); содержание древесины березы в композиции ( $x_3$ , %). Уровни варьирования факторов представлены в табл. 3. Выбор диапазонов варьирования температуры гидротермической обработки обусловлен различной температурой пластификации лигнина хвойных и лиственных пород [14]; расхода сульфита натрия – технологическими особенностями производства ТММ по методу RTS и экономической целесообразностью (табл. 3).

Результаты реализации плана эксперимента приведены в табл. 3. Статистическую обработку полученных экспериментальных данных в целях решения оптимизационных задач осуществляли с помощью встроенных функций электронных таблиц MS Excel. Установлено, что зависимости критериев оптимизации от независимых переменных описываются полиномами второго порядка с парным взаимодействием:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_1 \cdot x_2 + b_5 \cdot x_1 \cdot x_3 + b_6 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_7 \cdot x_1 \cdot x_1 + b_8 \cdot x_2 \times x_2 + b_9 \cdot x_3 \cdot x_3.$$

Полученные расчетным путем коэффициенты результирующего аппроксимирующего полинома представлены в табл. 4.

Таблица 2

**Параметры получения древесной массы из щепы**

Условия гидротермической обработки	Первая ступень размола	Вторая ступень размола
Используемое оборудование		
Лабораторный автоклав	Центробежный размалывающий аппарат (ЦРА)	Ножевая дисковая мельница (НДМ) лабораторного размалывающего комплекта (ЛКР)
Режимы		
Гидро модуль – 1:10 Температура – 155–175 Продолжительность выдержки – 15 мин	Продолжительность размола щепы – 30 мин Концентрация массы – 6%	Концентрация массы – 2% Частота вращения диска – 1200 и 2000 мин <sup>-1</sup>

Таблица 3

**Результаты реализации плана эксперимента**

Факторы			Критерии оптимизации		
Температура гидротермической обработки, °С	Расход сульфата натрия, %	Содержание древесины березы в композиции с елью, %	Степень помола, °ШР	Содержание крупноволокнистой фракции, %	Разрывная длина, км
155	0	0	59	33,9	3,15
165	0	0	66	36,1	3,39
175	0	0	70	38,1	3,65
155	0,5	0	64	35,0	3,30
165	0,5	0	68	33,5	3,64
175	0,5	0	73	31,0	3,84
155	1	0	67	37,9	4,12
165	1	0	72	42,5	4,73
175	1	0	77	47,9	4,98
165	0	15	69	34,8	3,00
175	0	15	74	39,2	3,34
165	0,5	15	71	37,9	3,50
155	1	15	70	33,4	3,48
175	1	15	79	41,1	3,67
155	0	30	70	29,3	2,65
165	0	30	74	32,1	2,72
175	0	30	77	33,6	3,29
155	0,5	30	72	28,7	3,15
175	0,5	30	81	31,5	3,29
155	1	30	73	33,7	3,14
165	1	30	76	31,1	3,51

Таблица 4

**Рассчитанные коэффициенты уравнений регрессий**

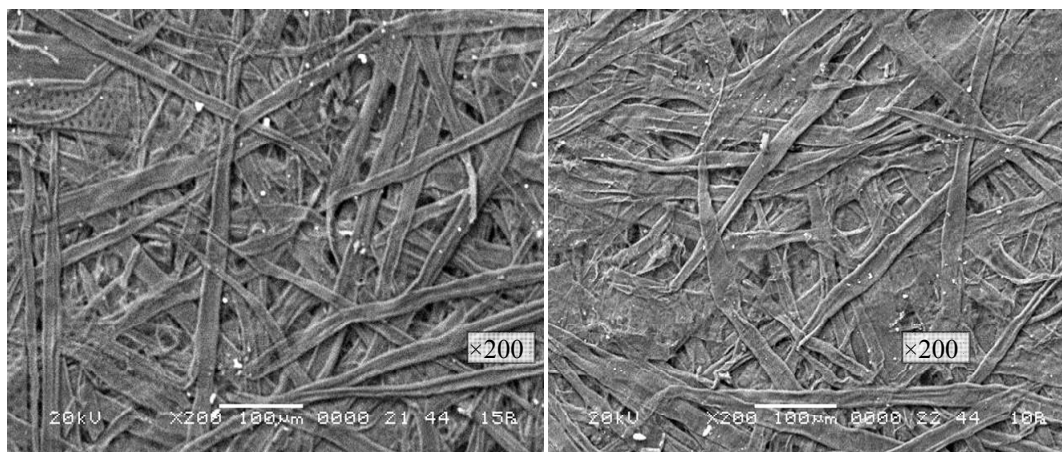
Значения коэффициента									
<i>b9</i>	<i>b8</i>	<i>b7</i>	<i>b6</i>	<i>b5</i>	<i>b4</i>	<i>b3</i>	<i>b2</i>	<i>b1</i>	<i>b0</i>
Степень помола									
0,001	-1,890	0,001	-0,160	-0,0040	-0,040	1,015	<b>15,630</b>	0,320	-5,110
Содержание крупноволокнистой фракции									
-0,009	11,870	-0,006	-0,203	-0,0030	0,044	0,601	<b>-13,020</b>	1,995	-144,740
Разрывная длина									
0,001	0,422	-0,001	-0,021	-0,0002	-0,002	0,002	<b>1,116</b>	0,315	-25,160

Анализ значений коэффициентов, приведенных в табл. 4, показал, что наибольший вклад в величину степени помола ( $y_1$ ) закономерно вносит расход активирующего древесные волокна сульфита натрия ( $x_2$ ). При этом с увеличением его расхода возрастает степень помола ТММ, определенная в соответствии с ГОСТ 14363.4. Это положительно отражается на фракционном составе ТММ, на что указывает снижение доли крупноволокнистой фракции и, как следствие, повышается ее прочность (табл. 3). В связи с тем, что действие сульфита натрия носит разнонаправленный характер для трех выбранных критериев оптимизации, необходимо было найти оптимальное сочетание факторов, обеспечивающих наилучшие бумагообразующие свойства ТММ с использованием в композиции ТММ древесины березы. Для этого применяли надстройку «Поиск решения» среды MS Excel. Установлено, что максимальное значение обобщенного критерия оптимизации  $W$ , равное 0,68, достигается при температуре гидротермической обработки  $170^\circ\text{C}$ , расходе сульфита натрия 1,0% и содержании древесины березы в композиции 20%.

При изготовлении термомеханической массы в соответствии с полученными значениями факторов (параметров) показатели качества ТММ и бумаги на ее основе были следующие: степень помола –  $75^\circ\text{ШР}$ ; содержание крупноволокнистой фракции – 38,4%; разрывная длина образца бумаги – 3,78 км. Кроме бумагообразующих свойств, важное значение при изготовлении бумаги для полиграфии оказывают оптические и печатные свойства используемых в композиции волокнистых полуфабрикатов. К ним относятся прежде всего нормируемая

стандартами белизна, а также оцениваемые при печати оптическая плотность поверхности, воспроизведение шрифтов, контраст печати и координаты цветности. Установлено, что при использовании сульфита натрия на стадии гидротермической обработки повышается белизна ТММ из еловой древесины на 22%, а из березовой древесины – на 15%. При этом в случае применения в композиции щепы древесины березы в количестве 20% улучшились на величину около 5% оптическая плотность, воспроизведение шрифтов, контраст печати и координаты цветности. Это можно объяснить формированием более сомкнутой структуры бумажного листа, что подтверждается методом сканирующей электронной микроскопии (рисунок).

Из рисунка видно, что за счет гидротермической обработки в присутствии сульфита натрия, вводимого в количестве 1%, происходит уплотнение поверхности бумаги путем более тесного соприкосновения волокон за счет пластификации лигноуглеводного комплекса и его частичного разрушения под действием сульфита натрия. Также для объяснения полученных результатов нами были применены методы термогравиметрии, ИК- и рентгенографии. Установлено, что в процессе термогидролитической обработки протекают физико-химические процессы, связанные с гидролитической деструкцией лигноуглеводного комплекса древесины. На это указывает снижение энергии активации для полисахаридов на 11% и увеличение данного показателя для лигноуглеводного комплекса на 78%; изменение пиковых интенсивностей полос поглощений в областях  $1243$ ,  $1732$ ,  $1738\text{ см}^{-1}$ ; повышение степени кристалличности целлюлозы с 55,7 до 61%.



а

б

Сканограммы поверхности бумаги на основе термомеханической массы из лиственной древесины:  
а – из необработанной химическим реагентом древесной щепы;  
б – из древесной щепы, обработанной сульфитом натрия

**Заключение.** Результаты проведенного эксперимента позволяют высказать рекомендации о замене 20% древесины ели на древесину березы при производстве ТММ и целесообразности применения обработки щепы сульфитом

натрия с расходом 1% на стадии гидротермической обработки, что приведет к формированию требуемого уровня физико-механических, оптических и печатных свойств получаемой на ее основе бумаги.

### Литература

1. Global production and trade of forest products in 2017: Statistiques des produits forestiers // FAO [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en/> (дата обращения 15.03.2019).
2. Глобальная лесная продукция 2015: факты и цифры // Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fao.org/3/a-i6669r.pdf> (дата обращения 15.03.2019).
3. Ежегодник лесной продукции ФАО 2016 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fao.org/3/19987M/i9987m.pdf> (дата обращения 15.03.2019).
4. Механическая древесная масса – полуфабрикат XXI века. Развитие технологии и оборудования, расширение производства и применения // ЛесПромИнформ. № 8 (39). 2006 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=1267> (дата обращения 15.03.2019).
5. Лесной фонд [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mlh.by/our-main-activites/forestry/forests> (дата обращения 15.03.2019).
6. Мониторинг лесов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nsmos.by/uploads/archive/Sborniki/7%20FOREST%20Monitoring> (дата обращения 01.04.2019).
7. Смолин А. С., Шабиев Р. О., Яккола П. Исследование дзета-потенциала и катионной потребности волокнистых полуфабрикатов // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 177–184.
8. Шагаев О. В., Бергстрем Б. Новая система производства механической массы высокого качества // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2005. № 9. С. 50–51.
9. Пузырев С. С. Современная технология механической массы: в 2-х т. СПб.: ВЕСП., 1996. Т. 2. Механическая масса из щепы. 236 с.
10. Соловьева Т. В., Шульга В. Э. Технология древесной массы из щепы. Минск: БГТУ, 2008. 136 с.
11. Особенности использования осинового сырья в ЦБП / Э. Л. Аким [и др.] // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2009. № 8. С. 54–60.
12. Способ получения волокнистого полуфабриката для газетной бумаги: пат. 20617 РБ, МПК D 21 В 1/02 / О. А. Новосельская, П. А. Письменский, Т. В. Соловьева, Ю. Г. Лука, Е. Л. Каташевич; заявитель учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет» (Республика Беларусь). № а20130975; заявл. 14.08.2013; опубл. 03.04.2015.
13. Пен Р. З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства. Красноярск: КГУ, 1982. 192 с.
14. Азаров В. И., Буров А. В., Оболенская А. В. Химия древесины и синтетических полимеров. СПб.: Лань, 2010. 624 с.

### References

1. Global production and trade of forest products in 2017: Statistiques des produits forestiers. *FAO*. Available at: <https://www.mlh.by/our-main-activites/forestry/forests> (accessed 15.03.2019).
2. Global Forest Products 2015: facts and figures. *Prodovol'stvennaya i sel'skokhozyaystvennaya organizatsiya Ob'yedenennykh Natsiy* [Food and Agriculture Organization of the United Nations]. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i6669r.pdf> (accessed 15.03.2019).
3. *Ezhegodnik lesnoy produktsii FAO 2016* [Yearbook of forest products FAO 2016]. Available at: <http://www.fao.org/3/19987M/i9987m.pdf> (accessed 15.03.2019).
4. Mechanical wood pulp – a semi-finished product of the XXI-century. Development of technology and equipment, expansion of production and use. *LesPromInform* [LesPromInform: Professional wood-working journal], 2006, no. 8 (39) (In Russian). Available at: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=1267> (accessed 15.03.2019).
5. *Lesnoy fond* [Forest Fund]. Available at: <https://www.mlh.by/our-main-activites/forestry/forests> (accessed 15.03.2019).
6. *Monitoring lesov* [Forest monitoring]. Available at: <http://www.nsmos.by/uploads/archive/Sborniki/7%20FOREST%20Monitoring> (accessed 01.04.2019).
7. Smolin A. S., Shabiev R. O., Jakkola P. Study of zeta potential and cationic demand of fibrous semi-finished products. *Himiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2009, no. 1, pp. 177–184 (In Russian).

8. Shagaev O. V., Bergstrom B. New high quality mechanical pulp manufacturing system. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Cellulose. Paper. Cardboard], 2005, no. 9, pp. 50–51 (In Russian).
9. Puzyrev S. S. *Sovremennaya tekhnologiya mekhanicheskoy massy. Tom 2. Mekhanicheskaya massa iz shchepy* [Modern technology of mechanical mass. Vol. 2. The mechanical mass of chips]. St. Petersburg, VESP Publ., 1996. 236 p.
10. Solov'yeva T. V., Shul'ga V. Je. *Tekhnologiya drevesnoy massy iz shchepy* [Pulp technology from wood chips]. Minsk, BGTU Publ., 2008. 136 p.
11. Akim E. L., Kovalenko M. V., Rasskazova N. Ya., Buchel'nikov Ya. V. Features of the use of aspen wood in pulp and paper industry. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton* [Cellulose. Paper. Cardboard], 2009, no. 8, pp. 54–60 (In Russian).
12. Novosel'skaya O. A., Pis'menskiy P. A., Solov'yova T. V., Luka Yu. G., Katashevich E. L. *Sposob polucheniya voloknistogo polufabrikata dlya gazetnoy bumagi* [The method of producing fibrous semi-finished product for newsprint]. Patent BY, no. 20617, 2016.
13. Pen R. Z. *Statisticheskiye metody modelirovaniya i optimizatsii protsessov tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Statistical methods for modeling and optimization of pulp and paper production processes]. Krasnoyarsk, KGU Publ., 1982. 192 p.
14. Azarov V. I., Burov A. V., Obolenskaya A. V. *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic polymer]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010. 624 p.

#### Информация об авторах

**Дубоделова Екатерина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры физико-химических методов сертификации продукции. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: katedubodelova@tut.by

**Шпак Сергей Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: spak\_s@belstu.by

**Письменский Павел Игоревич** – кандидат технических наук, ведущий специалист отдела развития производства. Унитарное предприятие «БР-Консалт» (220002, г. Минск, просп. Машерова, 35, Республика Беларусь). E-mail: pismenskiy.p@wood.by

**Соловьева Тамара Владимировна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: solovyova\_tv@belstu.by

#### Information about the authors

**Dubodelova Ekaterina Vladimirovna** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Physical and Chemical Methods of Products Certification. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: katedubodelova@tut.by

**Shpak Sergey Ivanovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: spak\_s@belstu.by

**Pis'menskiy Pavel Igorevich** – PhD (Engineering), Leading Specialist the Production Development Department. Unitary Enterprise “BR-Consult” (35, Masherova Ave., 220002, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pismenskiy.p@wood.by

**Solov'yeva Tamara Vladimirovna** – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: solovyova\_tv@belstu.by

Поступила 10.04.2019