

Модуль упругости при изгибе как показатель физико-механических свойств древесных пластиков без добавления связующих

А.В. Артёмов^a, А.В. Савиновских^b, В.Г. Бурындин^c

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

^a artemovav@m.usfeu.ru, ^b savinovskihav@m.usfeu.ru, ^c buryndinv@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7303-4912>; ^c <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>

Статья поступила 27.01.2021, принята 04.02.2021

Модуль упругости — одна из важнейших характеристик материала, которую необходимо знать не только при расчетах элементов конструкций на жесткость, но и в расчетах, связанных с устойчивостью, колебаниями, ударными нагрузками, при определении остаточных и температурных нагрузок и во многих других случаях (модуль упругости может быть использован даже при оценке износостойкости материала). Этот показатель коррелируется с другими прочностными показателями. Особенно тесная связь существует между модулем упругости при изгибе и прочностью при изгибе. Рассмотрена методика проведения определения модуля упругости при изгибе на образцах — дисках диаметром 90 мм для древесного пластика без добавления связующего (ДП-БС). Сущность метода заключается в определении модуля упругости при изгибе на плоских образцах-дисках. Предлагается для определения модуля упругости на образцах — дисках ДП-БС диаметром 90 и толщиной 2 мм нагрузку принимать равной 20 Н, а радиус кольцевой опоры — 80 мм. Установлено, что имеет место существенная зависимость модуля упругости при изгибе ДП-БС от его плотности. При описании зависимости между модулем упругости и плотностью пластика возможен выбор линейной зависимости (кривой 1-го порядка), так как коэффициент корреляции достаточно высок. Установлена корреляционная зависимость модуля упругости при изгибе ДП-БС от других физико-механических свойств, в частности прочности при изгибе. По полученным зависимостям, при наличии данных по модулю упругости при изгибе, можно косвенно судить о вышеуказанных свойствах.

Ключевые слова: древесные пластики; физико-механические свойства; модуль упругости; корреляция.

Flexural modulus as an indicator of physical and mechanical properties of wood plastics without the addition of binders

A.V. Artyomov^a, A.V. Savinovskikh^b, B.G. Buryndin^c

Ural State Forest Engineering University; 37, Sibirsky Tract St., Ekaterinburg, Russia

^a artemovav@m.usfeu.ru, ^b savinovskihav@m.usfeu.ru, ^c buryndinv@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0001-6994-0154>; ^b <https://orcid.org/0000-0001-7303-4912>; ^c <https://orcid.org/0000-0001-6900-3435>

Received 27.01.2021, accepted 04.02.2021

The elastic modulus is one of the most important characteristics of a material, which must be known not only when calculating structural elements for rigidity, but also in calculations related to stability, vibrations, shock loads, when determining residual and temperature loads, and in many other cases (the elastic modulus can be used even when assessing the wear resistance of a material). This indicator is correlated with other strength indicators. A particularly close relationship exists between flexural modulus and flexural strength. A technique for determining the modulus of elasticity in bending on specimens-disks with a diameter of 90 mm for wood plastic without the addition of a binder (WP-WR) is considered. The essence of the method is to determine the modulus of elasticity in bending on flat sample-discs. It is proposed to determine the elastic modulus on WP-WR disk specimens with a diameter of 90 mm and a thickness of 2 mm, the load should be taken equal to 20 N, and the radius of the annular support should be taken equal to 80 mm. It has been found that there is a significant dependence of the modulus of elasticity in bending WP-WR on its density. When describing the relationship between the modulus of elasticity and the density of plastic, it is possible to choose a linear relationship (first-order curve), since the correlation coefficient is quite high. The correlation dependence of the modulus of elasticity in bending WP-WR on other physical and mechanical properties, in particular, bending strength, has been established. From the obtained dependences in the presence of data on the modulus of elasticity in bending, one can indirectly judge the above properties.

Keywords: wood plastics; physical and mechanical properties; modulus of elasticity; correlation.

Введение. Качество древесных пластиков без добавления связующих (ДП-БС), как и качество пластиков на основе синтетических связующих, определяется степенью отверждения [1–4].

Одним из косвенных способов определения степени отверждения является способ определения модуля упругости отвержденного материала [5–6].

Согласно классической теории высокоэластичности полимерных сеток, модуль высокоэластичности E пропорционален плотности цепей сетки n_c [7]:

$$E = n_c \cdot K \cdot T,$$

где K — постоянная Больцмана; T — температура.

Отсюда следует, что густоту сетки можно оценивать по модулю упругости полимера, находящегося в высокоэластическом состоянии.

Измерение модуля упругости можно производить путем измерения прогиба при нагружении диска [5]. Причем в качестве диска может использоваться образец, полученный при определении вязкотекучих свойств пресс-материала [5]. Такой метод позволяет контролировать отверждение на более глубоких стадиях, чем метод экстрагирования или метод определения вязкопластических свойств, измеряемых на пластомере Канавца.

Модуль упругости при изгибе дисков определяется по результатам замера прогиба образцов по формуле:

$$E_{\text{изг}} = \frac{3 \cdot P \cdot r^2 (3 + \mu) \cdot (1 - \mu^2)}{4 \cdot \pi \cdot w \cdot h^3 (1 + \mu)},$$

где $E_{\text{изг}}$ — модуль упругости, Па; P — нагрузка в центре диска, Н; r — радиус опоры, м; w — прогиб диска в центре, м; μ — коэффициент Пуассона; h — толщина диска, м.

Для технических испытаний пресс-материалов коэффициент Пуассона принят равным 0,25, тогда после преобразования формула принимает вид:

$$E_{\text{изг}} = 0,58 \frac{P \cdot r^2}{h^3 \cdot w \cdot 1000000}, \text{ МПа.}$$

Определение модуля упругости производится следующим образом. Образец сразу после прессования (горячим) быстро помещают в устройство и нагружают с помощью груза. Усилие, создаваемое грузом должно быть таким, чтобы обеспечить прогиб диска в пределах 0,5–2 мм. Замеряют прогиб диска в центре с помощью индикатора часового типа [5].

Для ослабления межмолекулярных физических связей в материале, в камере устройства поддерживают температуру на 20–30 °С выше температуры прессования. При этом физические связи значительно ослабевают, и на этом фоне более рельефно проявляется химическая связь (степень отверждения).

Если испытания проводились на холодных образцах, через сутки или более после прессования, то получаемый модуль упругости можно рассматривать как один из показателей физико-механических свойств отвержденного пластика.

В работе [8] производится сравнение модуля упругости при изгибе у образцов ДП-БС полученных из различного исходного сырья на горячих и на холодных образцах. Установлено, что образцы на основе древесной муки, шлифовальной пыли фанеры и шлифовальной пыли ДСтП обладают одинаковым данным показателем, что объяснимо высокой плотностью материала.

Этот показатель коррелируется и с другими прочностными показателями. Особенно тесная связь существует между модулем упругости при изгибе $E_{\text{изг}}$ и прочностью при изгибе $\sigma_{\text{изг}}$. Анализ литературных данных по зависимости между этими величинами для дре-

весностружечных плит показал, что $\sigma_{\text{изг}}$ изменяется от 11 до 28 МПа, а $E_{\text{изг}}$ — от 1 700 до 3 800 МПа. Статистическая обработка данных, приведенных в указанной литературе, показывает, что коэффициент корреляции между $E_{\text{изг}}$ и $\sigma_{\text{изг}}$ равен 0,94 [9].

Аналогичная обработка данных приведенных в литературе [10] по ДП-БС, получаемым в виде плит, отпрессованных при давлении 2,5 МПа, показала, что $\sigma_{\text{изг}}$ изменяется в пределах 17–32 МПа, а $E_{\text{изг}}$ — в пределах 3500–5800 МПа. Коэффициент корреляции между прочностью при изгибе и модулем упругости при изгибе равен 0,96.

Методика исследования. С целью определения нагрузки P и радиуса опоры r при принятых размерах испытываемого диска-образца диаметром 90 мм и толщиной 2 мм, приводились испытания образцов-дисков на прогиб.

Производилось изменение радиуса опоры r , принимая его равным 35 мм и 40 мм, изменялась также нагрузка P в пределах от 5 до 50 Н.

Для отработки методики определения модуля упругости при изгибе на образцах-дисках диаметром 90 мм была изготовлена серия образцов из опилок сосны с гранулометрическим составом 0,7÷0,4 мм. Влажность пресс-материала варьировалась от 6,3 до 7,0 %.

Прессование образцов-дисков производилось в следующих условиях:

- температура прессования — 175–180 °С;
- давление прессования — 25 МПа;
- продолжительность прессования — 10 мин;
- продолжительность охлаждения под давлением — 10 мин;
- продолжительность кондиционирования образцов — 24 ч.

После кондиционирования отпрессованные образцы были перенесены в приспособление для замера прогиба под нагрузкой. Прогиб образцов измерялся одноразово с каждой стороны диска. По полученным измерениям определялось среднее значение прогиба.

По полученным значениям нагрузки P , прогиба w и толщины h образца рассчитывался модуль упругости $E_{\text{изг}}$ [5].

В табл. 1 приведены средние значения $E_{\text{изг}}$, полученные при нагрузках 5, 7, 8, 9 Н и опорах 7 и 8 см.

В табл. 2 приведены средние значения модуля упругости для каждого образца, независимо от диаметра применяемой опоры и нагрузки. По полученным данным была построена зависимость модуля упругости при изгибе пластика от его плотности $E_{\text{изг}} = f(\rho)$ (рис. 1).

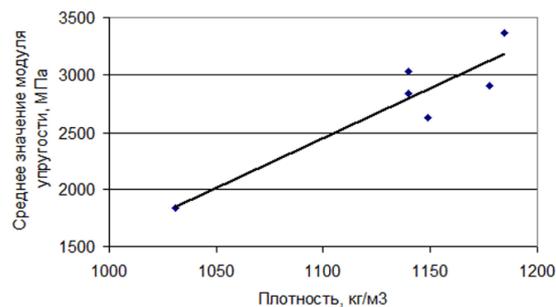


Рис. 1. Зависимость модуля упругости при изгибе от плотности пластика

Полученное линейное уравнение показывает зависимость модуля упругости пластика при изгибе от его плотности, при этом коэффициент корреляции составляет $R^2 = 0,8563$:

$$E = 8,8773\rho - 7099,7$$

На рис. 1 видно, что имеет место существенная зависимость модуля упругости при изгибе пластика от его плотности. Чем выше плотность ДП-БС, тем больше его жесткость. При описании зависимости между модулем упругости и плотностью пластика возможен выбор линейной зависимости (кривой 1-го порядка), так как коэффициент корреляции достаточно высок ($R^2 = 0,8425$).

С целью определения влияния диаметра опоры на модуль упругости диаметр опоры принимался 7 и 8 см (рис. 2).

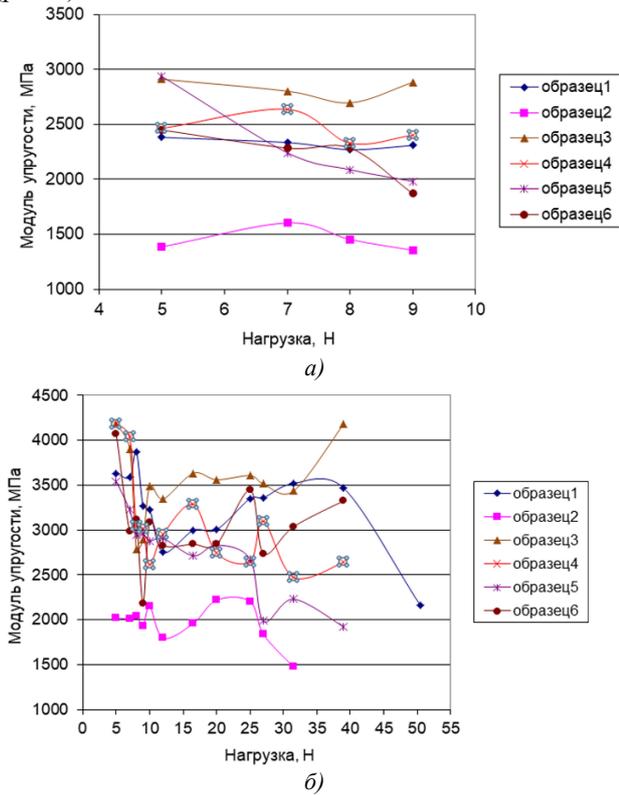


Рис. 2. Зависимость модуля упругости от нагрузки при диаметре опоры: а — 7 см, б — 8 см

На основании рис. 2 можно сделать вывод, что при нагрузках менее 10 Н, модуль упругости нестабилен — резко снижается и повышается. В диапазоне нагрузок от 10 до 20 Н свойства становятся более стабильными.

Для определения влияния нагрузки на модуль упругости нагрузка изменялась в пределах 5–50,5 Н (рис. 3).

Таблица 1. Влияние диаметра опоры на значение модуля упругости и прогиба

Образец	Среднее значение модуля упругости и прогиба при нагрузке 5÷9 Н			
	Диаметр опоры 7 см		Диаметр опоры 8 см	
	Модуль упругости, МПа	Прогиб диска, см	Модуль упругости, МПа	Прогиб диска, см
1	2 324,99	0,0209	3 590,41	0,0178
2	1 450,00	0,0265	2 001,98	0,025
3	2 824,01	0,0165	3 443,85	0,0188
4	2 458,68	0,019	3 569,87	0,0179
5	2 313,17	0,0233	3 167,81	0,0215
6	2 222,90	0,023	3 087,92	0,023
среднее значение	2 265,63	0,0215	3 143,64	0,0207

На основании рис. 3 можно сделать вывод, что при нагрузках менее 10 Н прогиб диска незначителен. В диапазоне нагрузок от 10 до 20 Н прогиб образцов становится стабильнее. После 20 Н прогиб резко возрастает.

С целью выявления корреляционной зависимости между физико-механическими свойствами для древесных пластиков, как и со связующими, так и без добавления связующих, изготавливались образцы древесно-композиционных материалов (ДКМ) диаметром 90 мм и толщиной 2 мм из следующего исходного сырья (в соответствии с технологическими режимами прессования, принятого для каждого пресс-материала):

- масса древесно-прессовочная на основе СФЖ 3110 (МДП СФЖ 3110);
- масса древесно-прессовочная на основе ЛБС 1 (МДП ЛБС 1);
- фенопласт 03-010-02;
- древесный пластик без добавления связующего из опилок ленточной пилорамы (ДП-БС ОЛП);
- древесный пластик без добавления связующего из шлифовальной пыли ДСтП (ДП-БС ШП-ДСтП);
- древесный пластик без добавления связующего из композиции: опилки ленточной пилорамы и лигнин (ДП-БС ОЛП/Лигнин).

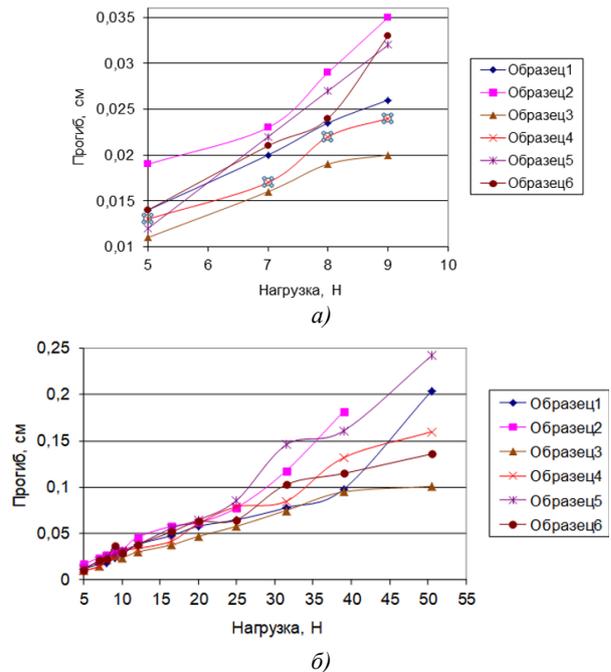


Рис. 3. Зависимость прогиба от нагрузки при диаметре опоры: а — 7 см, б — 8 см

Поскольку физико-механические свойства зависят от плотности ρ , то одновременно анализировалась зависимость их от плотности [11].

Отпрессованные образцы, кондиционированные в комнатных условиях в течение суток, переносились в приспособление для замера прогиба [12]. После испытаний на жесткость образцы-диски подвергались испытаниям на прочность при изгибе [13] и твердость [14]. Полученные данные по упругости, прочности и твердости образцов анализировались с помощью методов математической статистики, и определялась зависимость между:

– $E_{изг} — \sigma_{изг}$;

– $E_{изг} — НВ$;

– $\sigma_{изг} — НВ$;

– $\sigma_{изг} — \rho$.

Параллельно проводились исследования свойств древесно-полимерных композиционных материалов (ДПКМ) на основе фенолоформальдегидных олигомеров и древесных отходов.

Таблица 2. Результаты исследований

Материал	Свойства ДКМ				Свойства ДПКМ			
	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа	Модуль упругости при изгибе $E_{изг}$, МПа	Твердость НВ, МПа	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа	Прочность при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Водопоглощение W , %
МДП СФЖЗ110	1 236	55,94	4 814,99	131,13	1293	45,4	45,9	8,0
МДП ЛБС 1	1 225	42,97	4 277,13	172,73	1300	34,6	43,5	6,8
Фенопласт 0301002	1 263	64,46	4 645,81	241,98	–	–	–	–
ДП-БС ОЛП	1 251	19,09	5 065,71	65,76	–	–	–	–
ДП-БС ШП-ДСП	1 158	8,57	2 840,16	61,27	–	–	–	–
ДП-БС ОЛП / лигнин	1 108	5,74	–	20,85	–	–	–	–

Задачей исследования являлось изучение и сравнение физико-механических свойств материалов на основе связующего ЛБС-1, СФЖ-3013 и отходов деревообрабатывающих производств стружки и опилок.

Отпрессованное изделие: плитка прямоугольной формы размерами 157×111×8,5–10,0 мм. Физико-механические показатели ДПКМ определялись по ГОСТ 11368-89 [15].

Результаты исследований представлены в табл. 2.

По результатам исследований проведен анализ полученных данных по физико-механическим свойствам ДКМ и ДПКМ на основе фенолоформальдегидных олигомеров и древесных отходов (модуль упругости при изгибе $E_{изг}$, прочность при изгибе $\sigma_{изг}$, твердость НВ) и определена корреляционная зависимости между ними.

По полученным данным исследований были определены уравнения зависимости и величины достоверности аппроксимации (коэффициент корреляции). Результаты графического анализа полученных данных представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа между физико-механическими свойствами для древесных пластиков

№ п/п	Зависимость	Уравнения	Коэффициент корреляции (величина достоверности аппроксимации R^2)
1	$E_{изг} — \sigma_{изг}$	$y = 0,026x - 67,722$	0,5130
2	$\sigma_{изг} — НВ$	$y = 0,2795x + 3,2462$	0,8416
3	$E_{изг} — НВ$	$y = 0,0018x + 120,63$	0,0007
4	$\sigma_{изг} — \rho$	$y = 0,3745x - 422,16$	0,5499

Данные табл. 3 подтверждают следующее:

– не существует зависимости между модулем упругости при изгибе и твердостью для ДКМ.

– наличие зависимости между прочностью при изгибе и модулем упругости при изгибе для ДКМ, между прочностью при изгибе и твердостью для ДКМ, между плотностью и прочностью при изгибе для ДКМ.

В отличие от модуля упругости при изгибе, под твердостью подразумевают способность материала сопротивляться сосредоточенному на его поверхности напряжению на твердой поверхности.

Заключение. Проведенный анализ полученных данных между модулем упругости образцов ДП-БС, нагрузкой и радиусом опоры, а также данные корреляционной зависимости между физико-механическими свойствами позволяет сделать следующие выводы.

1. Для определения модуля упругости на образцах-дисках диаметром 90 мм и толщиной 2 мм нагрузку P следует принимать равную 20 Н. Выбор такой нагрузки объясним относительной стабильностью свойств образцов в этом диапазоне.

2. Для определения модуля упругости на образцах-дисках диаметром 90 мм и толщиной 2 мм, радиус кольцевой опоры r следует принимать равным 80 мм. Выбор такого радиуса объясним наиболее оптимальным прогибом образцов-дисков.

3. Имеется корреляционная зависимость модуля упругости при изгибе от других физико-механических свойств, в частности от плотности материала и прочности при изгибе. По полученным зависимостям при наличии данных по модулю упругости при изгибе можно косвенно судить о выше указанных свойствах.

4. При сравнении образцов-плиток ДПКМ на основе фенолоформальдегидных олигомеров и древесных от-

ходов с образцами-дисками ДКМ по прочности при изгибе выявлено, что прочность при изгибе у образцов-дисков больше, чем у образцов-плиток на 19 %. Это может быть объяснено масштабным фактором.

Литература

1. Мухин Н.М., Дедюхин В.Г., Воробьева Т.Л. Исследование кинетики и тепловых режимов образования древесного пластика без добавления связующего // Технология древесных плит и пластиков: межвуз. сб. Екатеринбург: УГЛТА, 1999. С. 102-108.
2. Ермолин В.Н., Казин С.Н., Байандин М.А., Намятов А.В. Разработка режима гидродинамической активации древесных частиц с целью получения плит без связующих веществ // Хвойные бореальной зоны. 2017. Т. 35. № 3-4. С. 79-83.
3. Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Титунин А.А., Свиридов А.В. Исследование влияния стабилизаторов на свойства карбамидоформальдегидного связующего и фанеры ФК // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 1 (37). С. 136-143.
4. Шишлов О.Ф., Дождиков С.А., Глухих В.В. Изучение влияния вида наполнителя на кинетику отверждения композиционных материалов на основе фенолкарданолформальдегидных новолачных смол // Химия растительного сырья. 2014. № 4. С. 219-227.
5. Ставров В.П., Дедюхин В.Г., Соколов А.Д. Технологические испытания реактопластов. М.: Химия, 1981. 248 с.
6. Дедюхин В.Г., Мухин Н.М. Исследование текучести древесной пресс-массы без добавления связующего // Технология древесных плит и пластиков: межвуз. сб. Екатеринбург: УГЛТА, 1999. С. 96-101.
7. Баргенов Г.М., Зеленов Ю.В. Курс физики полимеров. Л.: Химия, 1976. 288 с.
8. Ершова А.С., Артемов А.В., Савиновских А.В., Буриндин В.Г. Влияние вида сырья на свойства древесных пластиков без добавления связующих // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 3 (47). С. 74-80.
9. Дедюхин В.Г., Глухих В.В., Крымский Д.С., Крымская Т.Н. Неиспользованный резерв снижения материалоемкости производства древесностружечных плит // Технология древесных плит и пластиков: межвуз. сб. Екатеринбург, 1995. С. 69-72.
10. Плитные материалы и изделия из древесины и других одресневевших остатков без добавления связующих / под ред. В.Н. Петри. М.: Лесная пром-сть, 1976. 360 с.
11. Артёмов А.В., Буриндин В.Г., Дедюхин В.Г., Глухих В.В. Зависимость прочности при изгибе и водопоглощения от плотности древесного пластика без связующего // Технология древесных плит и пластиков: межвуз. сб. Екатеринбург, УГЛТУ, 2004. С. 24-31.
12. Дедюхин В.Г., Мухин Н.М., Ставров В.П. Методы контроля процесса отверждения реактопластов // Пластмассы. 1976. № 10. С. 66-67.
13. ГОСТ 4648-71. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. Введ. 25.11.71. М.: Изд-во стандартов, 1992. 12 с.
14. ГОСТ 4670-2015 (ISO 2039-1:2001). Пластмассы. Определение твердости. Метод вдавливания шарика. Введ. 01.01.2017. М.: Стандартинформ, 2016. 7 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках научного проекта «FEUG-2020-0013»

15. ГОСТ 11368-89. Массы древесные прессовочные. Технические условия. Введ. 26.06.1989. М.: Изд-во стандартов, 1989. 23 с.

References

1. Muhin N.M., Dedyuhin V.G., Vorob'eva T.L. Investigation of the kinetics and thermal modes of wood plastic formation without the addition of a binder // Tekhnologiya drevesnyh plit i plastikov: mezhvuz. sb. Ekaterinburg: UGLTA, 1999. P. 102-108.
2. Ermolin V.N., Kazicin S.N., Bayandin M.A., Namyatov A.V. Development of a regime of hydrodynamic activation of wood particles in order to obtain plates without binders // Conifers of the boreal area. 2017. V. 35. № 3-4. P. 79-83.
3. Fedotov A.A., Vahnina T.N., Titunin A.A., Sviridov A.V. Investigation of the effect of stabilizers on the properties of urea-formaldehyde binder and FC plywood // Forestry Engineering Journal. 2020. V. 10. № 1 (37). P. 136-143.
4. Shishlov O.F., Dozhdikov S.A., Gluhikh V.V. Study of the influence of the filler type on the curing kinetics of composite materials based on phenolcardanolformaldehyde novolac resins // Khimija Rastitel'nogo Syr'ja (Chemistry of plant raw material). 2014. № 4. P. 219-227.
5. Stavrov V.P., Dedyuhin V.G., Sokolov A.D. Technological tests of thermosets. M.: Himiya, 1981. 248 p.
6. Dedyuhin V.G., Muhin N.M. Study of the fluidity of wood press mass without the addition of a binder // Tekhnologiya drevesnyh plit i plastikov: mezhvuz. sb. Ekaterinburg: UGLTA, 1999. P. 96-101.
7. Bartenev G.M., Zelenov YU.V. The physics of polymers. L.: Himiya, 1976. 288 p.
8. Ershova A.S., Artemov A.V., Savinovskih A.V., Buryndin V.G. Influence of the raw material type on the properties of wood plastics without adding binders // Systems. Methods. Technologies. 2020. № 3 (47). P. 74-80.
9. Dedyuhin V.G., Gluhikh V.V., Krymskij D.S., Krymskaya T.N. Unused reserve for reducing the material consumption of chipboard production // Tekhnologiya drevesnyh plit i plastikov: mezhvuz. sb. Ekaterinburg, 1995. P. 69-72.
10. Slab materials and products made of wood and other desalinated residues without the addition of binders / pod red. V.N. Petri. M.: Lesnaya prom-s', 1976. 360 p.
11. Artyomov A.V., Buryndin V.G., Dedyuhin V.G., Gluhikh V.V. Dependence of bending strength and water absorption on the density of wood plastic without binder // Tekhnologiya drevesnyh plit i plastikov: mezhvuz. sb. Ekaterinburg, UGLTU, 2004. P. 24-31.
12. Dedyuhin V.G., Muhin N.M., Stavrov V.P. Methods of monitoring the curing process of thermosetting plastics // Plastmassy. 1976. № 10. P. 66-67.
13. GOST 4648-71. Plastics. Static bending test method. Vved. 25.11.71. M.: Izd-vo standartov, 1992. 12 p.
14. GOST 4670-2015 (ISO 2039-1:2001). Plastics. Determination of hardness. Ball indentation method. Vved. 01.01.2017. M.: Standartinform, 2016. 7 p.
15. GOST 11368-89. Wood pressing masses. Technical specifications. Vved. 26.06.1989. M.: Izd-vo standartov, 1989. 23 p.