

**АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ПИТУХИН**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*pitukhin@psu.karelia.ru*

**СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ ВАСИЛЬЕВ**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих производств лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*servas@psu.karelia.ru*

**ГЕННАДИЙ НИКОЛАЕВИЧ КОЛЕСНИКОВ**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики строительного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*kolesnikovgn@ya.ru*

**НИКОЛАЙ ГЕННАДЬЕВИЧ ПАНОВ**  
кандидат технических наук, преподаватель кафедры технологии металлов и ремонта лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*tmir@psu.karelia.ru*

**ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ КОПАРЕВ**  
аспирант кафедры целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих производств лесоинженерного факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)  
*cbd@psu.karelia.ru*

## МОДЕЛЬ РАЗРУШЕНИЯ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО ПЛАСТИ\*

Древесностружечные плиты (ДСтП) состоят из измельченной древесины. Для консолидации частиц используются фенолформальдегидные или другие менее токсичные смолы. Многими исследователями были изучены вопросы прочности ДСтП в зависимости от плотности материала плиты, от состава kleевых композиций и других факторов. Однако влияние гранулометрического состава измельченной древесины, используемой для изготовления ДСтП, при растяжении перпендикулярно пласти остается недостаточно изученным. Существует проблема прогнозирования сравнительной прочности ДСтП в зависимости от распределения крупности частиц. В данной статье предложена методика сравнительной оценки прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти в зависимости от гранулометрического состава древесных частиц. Материал ДСтП моделируется как набор частиц в форме эллипсоидов. Сила материала определяется как сила связи в точках контакта эллипсоидов. Предложен критерий сравнительной прочности древесностружечных плит в зависимости от гранулометрического состава. Модель и критерий не противоречат экспериментальным данным. По результатам исследования подтверждена возможность использования низкосортной древесины для изготовления ДСтП. Возместить недостаток прочности низкосортной древесины можно путем увеличения доли мелких частиц в материале плиты.

Ключевые слова: измельченная древесина, гранулометрический состав, прочность при растяжении перпендикулярно пласти

Древесностружечные плиты, как известно, состоят из частиц измельченной древесины, консолидированных с помощью связующего, в качестве которого используют фенолформальдегидные или менее токсичные смолы [1], [9]. К настоящему времени исследованы возможности совершенствования технологии ДСтП [8], соотношение плотности и прочности [7], влияние модификаторов kleевого раствора [3], [4], [6] и другие аспекты [5], [11]. К недостаточно

изученным относятся задачи о влиянии фракционного состава частиц измельченной древесины, используемой для изготовления ДСтП, на их прочностные свойства. Из всего комплекса появляющихся в этой связи вопросов в данной статье рассматривается методика сравнительной оценки прочности ДСтП при растяжении перпендикулярно пласти. Стандартные методы определения предела прочности базируются на механических испытаниях образцов ДСтП [2], [10].



Рис. 1. Фрагменты плиты после разрушения

Однако остается актуальной задача прогнозирования прочности плит в зависимости от гранулометрического состава измельченной древесины.

Гранулометрический состав измельченной древесины, очевидно, влияет на структуру материала плиты, которая, в свою очередь, определяет прочность при разрушении. Чтобы повысить прочность плиты, в частности при использовании измельченной низкокачественной древесины, используют модификаторы стружечно-клеевых композиций [3]. Получаемые при этом результаты не всегда подтверждают эффективность модификации. На это обстоятельство обращается внимание в статье [6], в которой сформулировано предположение о том, что прочность ДСтП на основе модифицированной стружечно-клевой композиции зависит от структуры материала плиты: если материал имеет четко выраженную гетерогенную структуру, то его прочность меньше по сравнению с материалом, имеющим квазигомогенную структуру. Для проверки этого предположения и получения количественных оценок необходима соответствующая математическая модель разрушения. Обратимся к интерпретации выполненных экспериментов [6].

Два фрагмента плиты, разрушенной в экспериментах при растяжении перпендикулярно пласти по стандартной методике [2], представлены на рис. 1.

Предположим, что все частицы имеют форму эллипсоидов с полуосами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  (рис. 1–3). Рассмотрим возможный механизм контактного взаимодействия двух условных слоев древесных частиц, которые разделены поверхностью разрушения плиты. Эти два слоя в поперечном сечении плиты схематично показаны на рис. 3. В сечении плиты на рис. 3 каждая частица одного слоя имеет в предполагаемой поверхности разрушения две точки контакта с частицами другого слоя.

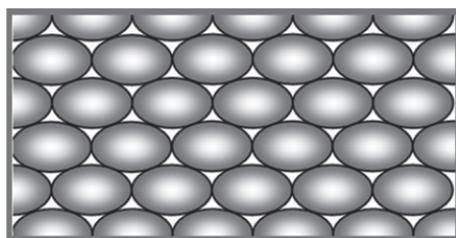


Рис. 2. Модель фрагмента плиты до разрушения

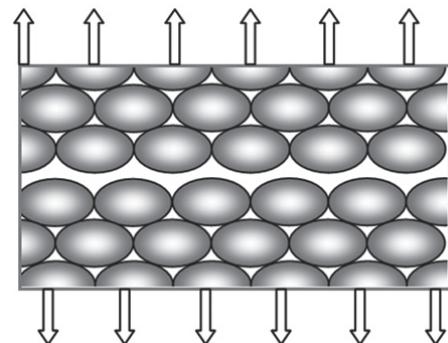


Рис. 3. Модель разрушенного фрагмента

гого слоя. Это двухмерный случай. В рассматриваемом далее трехмерном случае каждая частица будет иметь в предполагаемой поверхности разрушения как минимум три точки контакта с частицами другого слоя.

Пусть  $n$  – количество частиц одного слоя, контактирующих в точках предполагаемой поверхности разрушения с частицами другого слоя. Тогда в трехмерном случае минимальное число контактов в указанной поверхности  $N_k = 3n$ .

Рассмотрим некоторый фрагмент плиты площадью  $A$ , в котором количество частиц одного слоя по рис. 3 равно  $n$ . Пусть  $A_1$  – площадь проекции одной частицы на срединную плоскость плиты, причем  $A_1 \ll A$ . Тогда в трехмерном случае площадь проекции всех частиц одного слоя по рис. 4 равна  $nA_1$ . Примем во внимание пустоты между частицами и введем в рассмотрение безразмерный коэффициент заполнения  $p$ , который по своему геометрическому смыслу принимает значения  $0 < p < 1$ . Приближенно коэффициент заполнения  $p$  можно определить следующим образом. Пусть проекции всех частиц имеют форму эллипса с полуосами  $a$  и  $b$ . Тогда площадь проекции одной частицы  $A_1 = \pi ab$ . Предположим далее, что проекция каждой частицы вписана в прямоугольник со сторонами  $2a$  и  $2b$ . Тогда

$$p = \pi ab / 4ab = 0,785. \quad (1)$$

Приближенно считаем, что значения коэффициента заполнения  $p$  одинаковы как для прямоугольника, так и для всей площади  $A$ .

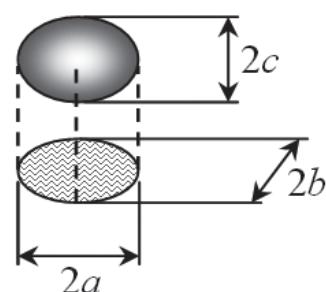


Рис. 4. Проекция модельной частицы на горизонтальную плоскость

По геометрическому смыслу задачи

$$pA = nA_1. \quad (2)$$

Тогда число частиц в одном слое по рис. 3

$$n = pA/A_1, \quad (3)$$

а минимальное число контактов этих частиц

$$N_k = 3n = 3pA/A_1. \quad (4)$$

С учетом равенства (1) перепишем формулу (4), учитывая, что  $A_1 = \pi ab$ :

$$N_k = 3 \cdot 0,785A / \pi ab = 0,75A / ab. \quad (5)$$

Очевидно, чем больше количество контактов частиц одного слоя, соприкасающихся в точках предполагаемой поверхности разрушения с частицами другого слоя (рис. 3), тем больше прочность плиты. Эта закономерность следует из формулы (5).

Формула (5) получена в предположении, что объем исследуемой плиты существенно превышает объем наиболее крупной древесной частицы. Это означает, что величина  $A$  в формуле (5) должна быть достаточно большой. Пусть  $A = 100 \text{ мм}^2$ .

Формула (5) получена в предположении, что все частицы одинаковы. Однако используемые для изготовления плит древесные частицы неодинаковы по своим размерам. При этом для крупных частиц количество контактов меньше, чем для мелких. В целом суммарное количество контактов в плоскости разрушения можно рассматривать как параметр прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты.

Можно прогнозировать, что поверхность разрушения пройдет через окрестности тех областей в объеме плиты, в которых число контактов минимально. Такой прогноз будет приближенным, поскольку предполагает, что прочность всех контактов одинакова.

Предлагаемый параметр прочности плиты обозначим как  $R$ . Пусть  $C_i$  – массовая доля (концентрация) частиц фракции  $i$ ,  $N_k^{(i)}$  – количество контактов частиц данной фракции по формуле (7),  $m$  – количество фракций. Тогда

$$R = \sum_{i=1}^m C_i N_k^{(i)}. \quad (6)$$

Оценка прочности в виде (6) является приближенной и не позволяет составить представление о прочности отдельно взятой плиты. Однако параметр (6) может быть рекомендован для сравнительной оценки прочности двух и более плит.

Формула (5) получена для дискретного случая, когда количество фракций равно  $m$ . Размеры же стружки являются непрерывными величинами. Введем коэффициент  $\alpha$ , определяющий соотношение осей эллипсоида  $\alpha = a/b$ , тогда число контактов с учетом (5)

$$N_k = 0,75A / \alpha a^2. \quad (7)$$

Пусть  $f(a)$  – плотность распределения длины древесной частицы  $a$ . Тогда  $C_i = \int_{a_{i-1}}^{a_i} f(a)da \approx f(a_i)\Delta a$ , где  $\Delta a = a_i - a_{i-1}$ , или  $\Delta a = (a_{\max} - a_{\min})/m$ ,  $a_{\min}$  и  $a_{\max}$  – наименьший и наибольший размеры стружки соответственно. Если  $\Delta a \rightarrow 0 (m \rightarrow \infty)$ , то

$$R = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} N_k(a, \alpha) f(a)da. \quad (8)$$

С учетом (7) при  $\alpha = \text{const}$  получим:

$$R = 0,75 \frac{A}{\alpha} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \frac{f(a)}{a^2} da. \quad (9)$$

Выражения (7) и (9) показывают, что с уменьшением размеров частиц количество контактов между ними увеличивается. Это приводит к повышению прочности.

Рассмотрим применение формулы (9) для сравнительной оценки прочности среднего и наружных слоев древесно-стружечной плит, экспериментально исследованных в работе [6].

В табл. 1 и 2 приведены данные [6] о фракционном составе древесных частиц, использованных для изготовления среднего и наружных слоев ДСТП, а также результаты вычислений по (5) и (9). Сравнивая показатели прочности материала среднего (874) и наружного (6459) слоя плиты, можно прогнозировать, что закономерно разрушится средний слой. Этот прогноз подтвержден экспериментами [3], [4], [6].

Важно подчеркнуть, что предлагаемый показатель прочности (9) вычисляется в расчете на единицу площади и пригоден только для сравнительной оценки прочности плит. На необходимость сравнительной оценки прочности плит в зависимости от качества измельченной древесины указывается в ряде работ, например в [8]. В статье [5] показана актуальность исследования

Таблица 1  
Влияние фракций древесных частиц на прочность среднего слоя плиты

Номер фракции, $i$	$2a, \text{мм}$	$2b, \text{мм}$	$N_k$ при $A = 100 \text{ мм}^2$	Массовая доля (%) и концентрация частиц (в скобках)	Вклад фракции $i$ в прочность $R$	Относительный вклад фракции $i$ в прочность плиты (%)
1	5	3,5	17,2	24,9 (0,249)	4,3	0,5
2	3,15	2,1	45,2	17,3 (0,173)	7,8	0,9
3	2	1,1	34,1	29,8 (0,298)	10,2	1,2
4	1	0,6	500	21,9 (0,219)	109,5	12,5
5	0,5	0,3	2000	4,1 (0,041)	82,0	9,4
6	0,2	0,1	15 000	1,2 (0,012)	180,0	20,6
7	0,1	0,05	60 000	0,8 (0,008)	480,0	54,9
Итого				100 (1)	874	100

Таблица 2  
Влияние фракций древесных частиц  
на прочность наружного слоя плиты

Номер фракции, <i>i</i>	2 <i>a</i> , мм	2 <i>b</i> , мм	$N_k$ при $A = 100 \text{ mm}^2$	Массовая доля (%) и концентра- ция частиц (в скобках)	Вклад фракции <i>i</i> в проч- ность <i>R</i>	Относитель- ный вклад фракции <i>i</i> в прочность плиты (%)
1	5	3,5	17,2	0	0,0	0,0
2	3,15	2,1	45,2	0	0,0	0,0
3	2	1,1	34,1	0,2 (0,002)	0,07	0,0
4	1	0,6	500	12,5 (0,125)	62,5	1,0
5	0,5	0,3	2000	44,4 (0,444)	888	13,7
6	0,2	0,1	15 000	32,6 (0,326)	4890	75,7
7	0,1	0,05	60 000	10,3 (0,103)	618	9,6
<b>Итого</b>			<b>100 (1)</b>	<b>6459</b>		<b>100</b>

ний по совершенствованию технологии производства ДСТП и обосновывается необходимость расширения номенклатуры сырьевой базы за счет рационального использования низкокачественной древесины и обоснования составов стружечно-клевые композиций [1]. Однако для достижения этой цели необходимы методики прогнозирования прочности плит в зависимости от фракционного состава измельченной древесины. Один из возможных критериев прочности в виде (9) предложен в данной работе. Вычисления могут быть выполнены в табличной форме с применением стандартных инструментов Microsoft Office Excel, по аналогии с приведенными выше табл. 1 и 2.

\* Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ПетрГУ в рамках реализации комплекса мероприятий по развитию научно-исследовательской деятельности на 2012–2016 гг.

Результаты сравнительной оценки прочности ДСТП в зависимости от фракционного состава с использованием предложенного критерия подтверждают сформулированное в работе [6] предположение о том, что если материал имеет четко выраженную гетерогенную структуру, то его прочность при растяжении перпендикулярно пласти меньше по сравнению с материалом, имеющим квазигомогенную структуру.

Влияние фракционного состава древесных частиц на прочность ДСТП при изгибе предполагается определить в дальнейших исследованиях. Итоги выполненного исследования дают основания для следующих выводов.

1. С применением экспериментальных данных предложена и обоснована методика сравнительной оценки прочности ДСТП при растяжении перпендикулярно пласти плиты. Методика может быть рекомендована для прогнозирования влияния фракционного состава частиц измельченной древесины на прочность плит.

2. В качестве материала для ДСТП можно использовать низкокачественную древесину. При этом компенсировать относительно небольшое сопротивление частиц измельченной низкокачественной древесины можно за счет увеличения доли мелких частиц, а для прогнозирования прочности плит в зависимости от фракционного состава измельченной древесины использовать предложенный критерий.

3. Установлено, что вклад наиболее крупных частиц в прочность плиты при растяжении перпендикулярно пласти существенно меньше вклада мелких частиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 10632–2007. Плиты древесностружечные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2007. 10 с.
- ГОСТ 10636–88. Плиты древесностружечные. Методы определения предела прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты. М.: Изд-во стандартов, 1990. 6 с.
- Панов Н. Г., Питухин А. В., Рожков С. С., Цветков В. Е., Санавин В. Г., Фирюлина О. В. Древесностружечные плиты на основе карбамидоформальдегидной смолы, модифицированной наноразмерным шунгитом // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 2. С. 135–138.
- Панов Н. Г., Рожков С. С., Питухин А. В. Повышение водостойкости трехслойных древесно-стружечных плит на основе карбамидоформальдегидной смолы при введении наноразмерного шунгитового наполнителя в связующее // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2011. № 8 (121). С. 88–91.
- Плотников Г. П., Денисов С. В. Оптимизация технологических параметров в производстве древесностружечных плит на основе маломольных смол с использованием стружки из отходов некондиционной древесины // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2010. № 8. С. 10–14.
- Питухин А. В., Панов Н. Г., Колесников Г. Н., Васильев С. Б. Влияние добавки нанопорошка шунгита в клеевой раствор для изготовления трехслойных древесностружечных плит на их физико-механические свойства // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.science-education.ru/104-6886](http://www.science-education.ru/104-6886)
- Разинков Е. М. Обоснование возможности получения древесно-стружечных плит пониженной плотности // Лесотехнический журнал. 2011. № 4. С. 55–59.
- Разинков Е. М., Ищенко Т. Л. Разработка режимов охлаждения древесностружечных плит на основе малотоксичных смол // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 76. С. 433–442.
- Чубинский А. Н., Брутян К. Г. Формирование древесно-стружечных плит пониженной токсичности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2009. Вып. 186. С. 156–162.
- EN 319. «Particleboards and fibreboards – determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board» / Austrian Standards Institute. Vienna, 1993.
- Veigel S., Rathke J., Weigl M., Gindl-Altmutter W. Particle Board and Oriented Strand Board Prepared with Nanocellulose-Reinforced Adhesive // Journal of Nanomaterials. Vol. 2012. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/158503/>

**Pitukhin A. V.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Vasil'ev S. B.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Kolesnikov G. N.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Panov N. G.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)  
**Koparev V. S.**, Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

## PARTICLEBOARDS' DESTRUCTION MODEL IN TENSILE STRENGTH PERPENDICULAR TO SAWN WOOD FACE

Particle boards (PB), as it is known, consist of chopped wood. Phenol-formaldehyde or other less toxic resins are used for consolidation of the particles. Numerous researchers studied the problem of the particle boards' strength in correlation with their density, adhesive components, and other factors. Though the influence of the particle size composition and distribution when manufacturing particle boards at tensile strength perpendicular to the sawn wood face remains insufficiently investigated. The problem of forecasting comparative strength of PBs in correlation with the size distribution of the particles persists. The work provides a methodology for comparative assessment of PBs strength in tension perpendicular to the sawn wood face. PBs material is modeled as a set of particles in the form of ellipsoids. The strength of material is determined as the strength of the bond at the contact points of ellipsoids. The destruction model of PB, as well as the criterion for determining comparative strength of the particle boards depending on the particle size distribution are proposed. This model and the criterion are consistent with experimental data. Based on the results of the study it was concluded that the use of the low-grade wood for PBs manufacture is admissible. The strength deficiency of the low-grade wood can be compensated by the increase of the fine particles' quality.

Key words: chopped wood; particle size distribution; durability at stretching perpendicular to sawn wood face

### REFERENCES

1. GOST 10632–2007. *Plity drevesnostruzhechnye. Tekhnicheskie usloviya* [Wood-chipboards. Specification]. Moscow, Izd-vo standartov, 2007. 10 p.
2. GOST 10636–88. *Metody opredeleniya predela prochnosti pri rastyazhenii perpendikulyarno plasti plity* [Wood-chipboards. Plity drevesnostruzhechnye. Detection methods of ultimate resistance under perpendicular traction of chipboard's battens]. Moscow, Izd-vo standartov, 1990. 6 p.
3. Panov N. G., Pitukhin A. B., Rozhkov S. S., Tsvetkov V. E., Sanaev V. G., Firulina O. V. *Drevesno-struzhechnye plity na osnove karbamidoformal'degidnoy smoly, modifitsirovannoy nanorazmernym shungitom* [Wood-chipboards based on amino-formaldehyde resin modified by nano-sized shungite]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forest messenger MSFU]. 2012. № 2 (85). P. 135–139.
4. Panov N. G., Rozhkov S. S., Pitukhin A. V. Waterproofing of triplex wood-chipboards based on amino-formaldehyde resin by injection of nano-sized shungite in coupler [Povyshenie vodostoykosti treksloynykh drevesno-struzhechnykh plit na osnove karbamidoformal'degidnoy smoly pri vvedenii nanorazmernogo shungitovogo napolnitelya v svyazuyushchee]. Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. "Estestvennye i tekhnicheskie nauki" [Proceedings of Petrozavodsk State University. Natural and Engineering Sciences. 2011. № 8 (121). P. 85–88.
5. Plotnikova G. P., Denisov S. V. Optimization of technological parameters in production of wood-shaving plates on the basis of low-molar pitches with using spills from waste of sub-standard wood [Optimizatsiya tekhnologicheskikh parametrov v proizvodstve drevesnostruzhechnykh plit na osnove malomol'nykh smol s ispol'zovaniem struzhki iz otkhodov nekonditsionnoy drevesiny]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2010. № 8. P. 10–14.
6. Pitukhin A. V., Panov N. G., Kolesnikov G. N., Vasil'ev S. B. Influence of nano-sized shungite additive in adhesive solution for producing triplex wood-chipboards on mechanical-and-physical properties [Vliyanie dobavki nanoporoshka shungita v kleevoy rastvor dlya izgotovleniya treksloynykh drevesno-struzhechnykh plit na ikh fiziko-mekhanicheskie svoystva]. *Sovremennye problemnye nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2012. № 4. Available at: <http://www.science-education.ru/104–6886>
7. Razin'kov E. M. Justification of possibility of receiving wood-shaving plates of the lowered density [Obosnovanie vozmozhnosti polucheniya drevesno-struzhechnykh plit ponizhennoy plotnosti]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*. 2011. № 4. P. 55–59.
8. Razin'kov E. M., Ishchenko T. L. Elaboration of the regimes of cooling of shaving boards made from small-toxic resins [Razrabotka rezhimov okhlazhdeniya drevesnostruzhechnykh plit na osnove malotoksichnykh smol]. *Politekhnicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. № 76. P. 433–442.
9. Chubinskiy A. N., Brutyant K. G. Formation of wood-chipboards with hypotoxicity [Formirovaniye drevesno-struzhechnykh plit ponizhennoy toksichnosti]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of Saint-Petersburg forest engineering academy]. 2009. Is. 186. P. 156–163.
10. EN 319. "Particleboards and fiberboards – determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board" / Austrian Standards Institute, Vienna, 1993.
11. Veigel S., Rathke J., Weigl M., Gindl-Altmutter W. Particle Board and Oriented Strand Board Prepared with Nanocellulose-Reinforced Adhesive // *Journal of Nanomaterials*. Vol. 2012. Available at: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/158503/>

Поступила в редакцию 20.06.2013