

ВЛИЯНИЕ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УСУШКИ

В.П. ГАЛКИН, *проф.*, МГУЛ, *д-р техн. наук*⁽¹⁾,

В.Г. САНАЕВ, *проф.*, МГУЛ, *д-р техн. наук*⁽¹⁾,

Б.Н. УГОЛЕВ, *проф.*, МГУЛ, *д-р техн. наук*⁽¹⁾,

А.А. КАЛИНИНА, *вед. инж.*, МГУЛ⁽¹⁾

rector@mgul.ac.ru, vgalkin@mgul.ac.ru, kalinina@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»

141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д.1

При удалении связанной адсорбционной воды возникает усушка древесины. Если усушка древесины происходит под нагрузкой, коэффициент усушки изменяется в зависимости от величины и направления действующих напряжений. При растяжении усушка уменьшается, а при сжатии возрастает.

Влияние растягивающей нагрузки на величину усушки исследовали на экспериментальной установке. Уменьшение усушки при увеличении растягивающих напряжений описывается линейной зависимостью. При напряжениях, приближающихся к пределу прочности древесины, усушка составляет менее 30 % от свободной. Уменьшенное нагрузкой значение усушки получило название редуцированная усушка β' , а отношение редуцированной усушки к свободной усушке β – коэффициент редуцирования K' .

При свободной усушке зависимость усушки от влажности древесины включает два характерных диапазона. Начальный, нелинейный, до влажности 15 % и второй, линейный, от влажности 15 % и менее. На первом диапазоне происходит удаление как адсорбционной воды, так и микрокапиллярной. Усушку вызывает снижение количества адсорбционной воды. На втором участке зависимости присутствует только адсорбционная вода, в связи с чем зависимость усушки приобретает линейный характер.

Растягивающая нагрузка придает зависимости усушки от влажности древесины дополнительную нелинейность. Начало линейного участка зависимости смещается в сторону более низкой влажности. При увеличении нагрузки не только снижается значение усушки, но и уменьшается влажность начала линейного диапазона.

Исследование коэффициентов усушки нагруженной древесины создает основу разработки более точных математических моделей для расчетов напряженного состояния древесины в процессах ее гидротермической обработки.

Ключевые слова: коэффициент усушки, влажность древесины, усушка, напряжения, остаточные деформации.

При удалении связанной адсорбционной воды возникает усушка древесины. Если усушка древесины происходит под нагрузкой, коэффициент усушки изменяется в зависимости от величины и направления действующих напряжений. При растяжении усушка уменьшается, а при сжатии возрастает.

Процессы сушки древесины сопровождаются градиентами влажности по толщине сортиментов [1]. Когда влажность поверхностных зон становится ниже предела насыщения клеточных стенок древесины, возникают растягивающие напряжения вследствие сопротивления внутренних зон свободной усушке. При этом во внутренних зонах действуют сжимающие напряжения [2, 9].

На рис. 1 приведена свободная усушка древесины сосны в радиальном и тангенциальном направлении [3, 10].

В зависимостях усушки от влажности древесины прослеживаются два участка. Начальный нелинейный от влажности около 60 % до 15 %. Второй, практически линейный, при влажности менее 15 %. Нелинейность зависимости усушки от влажности возникает в результате удаления микрокапиллярной воды, не вызывающей усушку, вместе с адсорбционной, создающей в клеточной стенке капилляры переменного сечения [4–8]. При влажности менее 15 % древесина содержит только адсорбционную воду, энергия связей которой с древесинным веществом намного превосходит энергию связей микрокапиллярной воды. Поэтому зависимость усушки от влажности приобретает линейный характер.

Влияние растягивающей нагрузки на величину усушки исследовали на экспериментальной установке. Уменьшение усушки



Рис. 1. Зависимость тангенциальной и радиальной усушки от влажности древесины
Fig. 1. The dependence of the tangential and radial shrinkage on the wood moisture

при увеличении растягивающих напряжений описывается линейной зависимостью. При напряжениях, приближающихся к пределу прочности древесины, усушка составляет менее 30 % от свободной. Уменьшенное нагрузкой значение усушки получило название редуцированной усушки β' , а отношение редуцированной усушки к свободной усушке β – коэффициента редуцирования K' [7, 11].

На рис. 2 приведены результаты одного из опытов, подтверждающие указанные положения. Влажный образец древесины ясеня вначале нагружали и сушили под постоянной растягивающей нагрузкой. Высушенный образец разгружали и выдерживали; затем его вновь вымачивали до первоначальной влажности.

Здесь вверх от нулевой линии отложены деформации сжатия, а вниз – растяжения. Кривая 0–1–2 представляет упруго-эластическую деформацию при растяжении влажной древесины $\varepsilon_{ev1} = 0,015$. (Из-за краткости начального периода нагружения пластические деформации практически отсутствуют.) Кривая 2–3–4 отражает достаточно продолжительную сушку под нагрузкой ($P = 50\text{Н}$). На участке 4–5–6 показано возвращение упруго-эластической деформации сухой древесины $\varepsilon_{ev2} = 0,006$ после разгрузки и некоторой выдержки.

Для анализа деформационных превращений древесины нанесены кривая сво-

бодной усушки 2'–11 и кривая последующего свободного разбухания 11–12 по данным измерений парного образца. Ордината точки 11 соответствует величине свободной усушки $\beta = 0,106$ к моменту разгрузки образца (точка 4). Ордината точки 4 отражает величину усушки $\beta_s = 0,056$. Усадке $\beta^* = \beta_s + \varepsilon_{ev2} = 0,056 + 0,006 = 0,062$ древесины, высушенной под нагрузкой, соответствует ордината точки 6. Общая невозвращенная после разгрузки деформация (отрезок 6–11) включает три вида деформаций: полную замороженную упруго-эластическую ε_f , соответствующую отрезку 6–8, пластическую ε_p и замороженную усушку β_f .

При увлажнении древесины, начатом в момент, соответствующий точке 6, происходят два противоположно направленных процесса: «размораживание» замороженных деформаций и разбухание образца. Отрезок 6–7 отражает результат частичного размораживания и разбухания образца. Полное размораживание $\varepsilon_f = \varepsilon_{ev1} - \varepsilon_{ev2} = 0,015 - 0,006 = 0,009$ соответствует отрезку 6–8. Дальнейшее увлажнение восстанавливает первоначальный размер образца (точка 9) и выявляет накопленную во время сушки и не изменившуюся при вымачивании пластическую деформацию растяжения $\varepsilon_p = 0,007$ (отрицательная ордината точки 10). Деформация ε_p представлена отрезком 8–13. Участок 12–13 соответствует редуцированной усушке $\beta' = 0,076$. Отре-

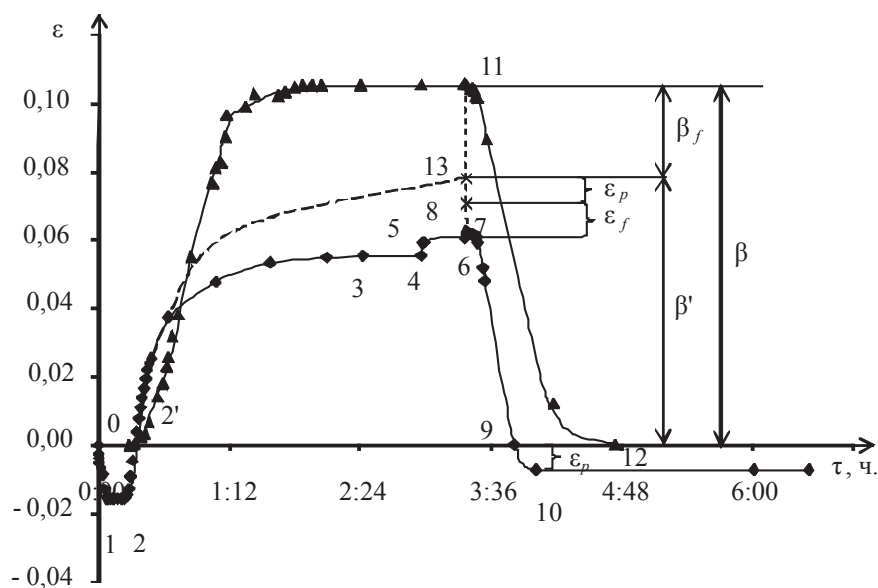


Рис. 2. Изменение деформации во время опыта (ясень, растяжение, танг. $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W_{\text{нач.}} = 86\%$, $W_{\text{кон.}} = 2\%$, $P = 50\text{ Н}$)

Fig. 2. Change of deformation during the experiment (Ash, stretching, tang. $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W_{\text{нач.}} = 86\%$, $W_{\text{кон.}} = 2\%$, $P = 50\text{ Н}$)

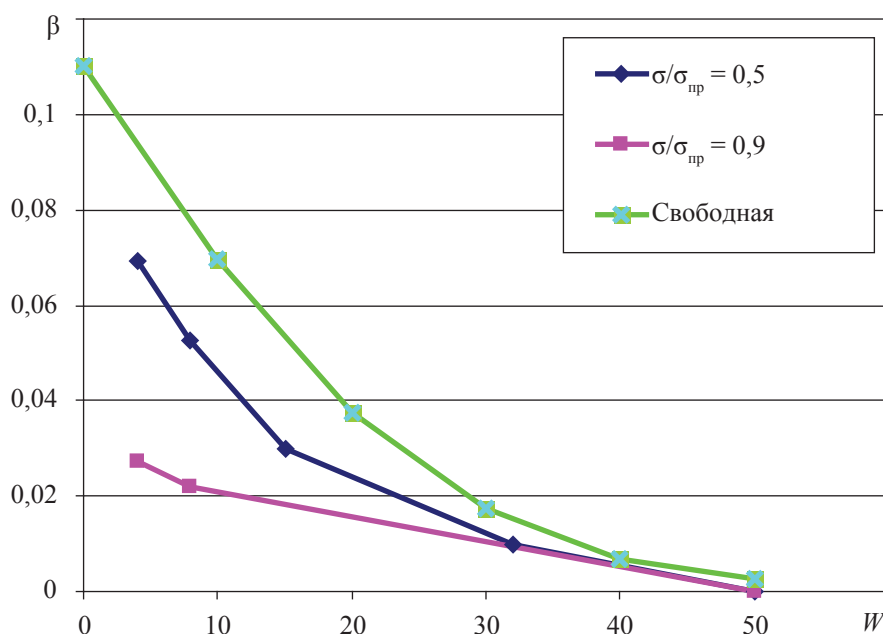


Рис. 3. Зависимость усушки от влажности древесины при различных значениях растягивающей нагрузки
Fig. 3. The dependence of shrinkage on the wood moisture at different values of tensile load

зок 11–13 отражает замороженную усушку $\beta_f = \beta - \beta' = 0,106 - 0,076 = 0,030$.

При воздействии растягивающей нагрузки изменяется характер зависимости величины усушки от влажности древесины [7]. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости усушки от влажности древесины. Величина растягивающей нагрузки

составляла 0, 5 и 0, 9 от предела прочности при растяжении в тангенциальном направлении при влажности древесины выше предела насыщения клеточных стенок. Экспериментально установлено, что при нагрузках до половины предела прочности характер зависимости редуцированной усушки от влажности древесины подобен усушке при

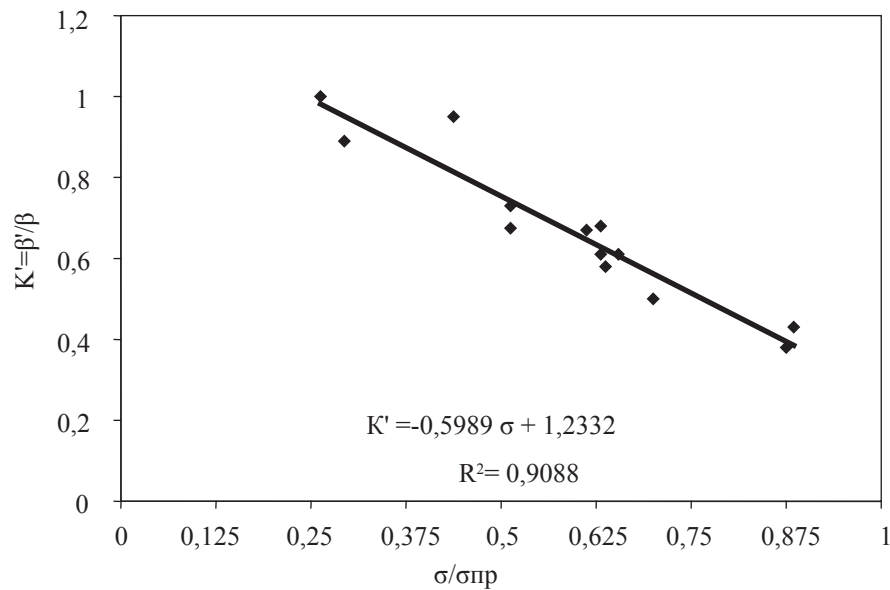


Рис. 4. Зависимость «редуцированной усушки» от напряжений (ясень, растяжение, танг. $t = 80$ °C, $W \geq W_{пн}$, $\sigma = 1, 6$ МПа)

Fig. 4. Dependence of «reduced shrinkage» on stress (Ash, stretching, tang. $T = 80$ °C, $W \geq W_{пн}$, $\sigma = 1, 6$ МПа)

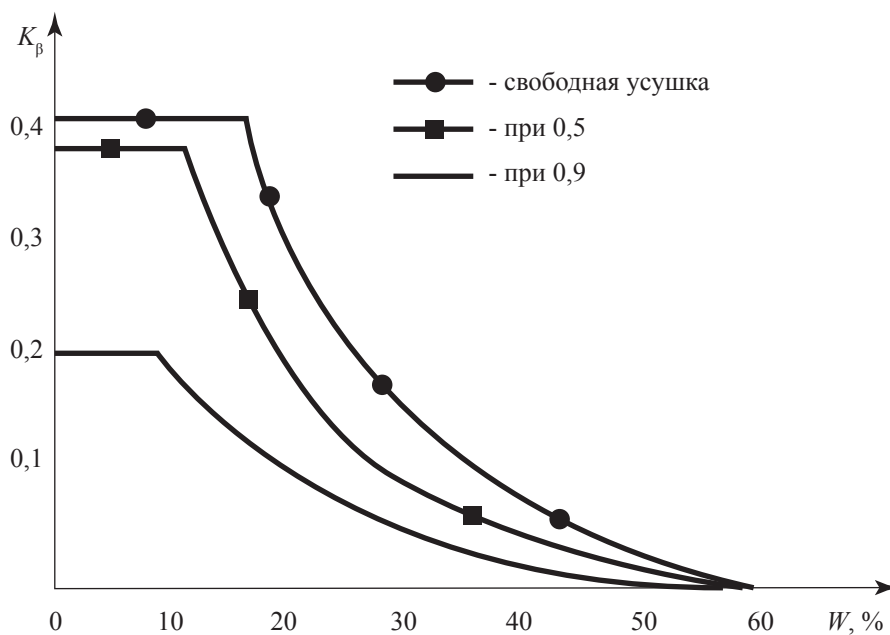


Рис. 5. Изменение коэффициентов усушки в зависимости от растягивающей нагрузки

Fig. 5. Variation of shrinkage factors depending on the tensile stress

отсутствии напряжений. В диапазоне начальной влажности до 15 % зависимость нелинейная. При дальнейшем снижении влажности зависимость приобретает линейный характер. Нагрузки, превышающие половину предела прочности древесины, увеличивают протяженность диапазона нелинейной зависимости.

Как следует из рис. 3, величина замороженной усушки также повышается при снижении влажности. Аналогичные зависимости могут быть использованы при определении коэффициента замороженной усушки.

Зависимость редуцированной усушки от величины нагрузки можно считать линей-

ной. Отношение редуцированной усушки β' к свободной β получило название коэффициента редуцирования K' . Зависимость коэффициента редуцирования от величины относительной растягивающей нагрузки приведена на рис. 4. Как видно из приведенного рисунка, при напряжениях, близких к пределу прочности древесины, величина усушки составляет менее 30 % от свободной.

Эти данные необходимы для уточненного расчета сушильных напряжений, в котором учитывается влияние величины нагрузки и диапазона снижения влажности на величину коэффициента усушки древесины.

При свободной усушке зависимость усушки от влажности древесины включает два характерных диапазона. Начальный, нелинейный, до влажности 15 % и второй, линейный, от влажности 15 % и менее. На первом диапазоне происходит удаление как адсорбционной воды, так и микрокапиллярной. Усушку вызывает снижение количества адсорбционной воды. На втором участке зависимости присутствует только адсорбционная вода, в связи с чем зависимость усушки приобретает линейный характер.

Растягивающая нагрузка придает зависимости усушки от влажности древесины дополнительную нелинейность. Начало линейного участка зависимости смещается в сторону более низкой влажности. При увеличении нагрузки не только снижается значение усушки, но и уменьшается влажность начала линейного диапазона.

Исследование коэффициентов усушки нагруженной древесины создает основу

разработки более точных математических моделей для расчетов напряженного состояния древесины в процессах ее гидротермической обработки.

Библиографический список

1. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. 4-е издание, перераб. и доп. / П.С. Серговский, А.И. Расев. – М.: Лесная пром-сть, 1987. – 360 с.
2. Уголев, Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов – М.: Лесная пром-сть, 1980. – 208 с.
3. Галкин, В.П. Исследование влияния температуры на усушку микросрезов древесины / В.П. Галкин // Деревообрабатывающая промышленность. – 2010. – Вып. 1. – С. 9–10.
4. Лоскутов, С.Р. Взаимодействие древесины с физически активными низкомолекулярными веществами / С.Р. Лоскутов. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 172 с.
5. Клеточная стенка древесины и ее изменения при химическом воздействии / И.И. Бейнарт и др. – Рига: 1972. – 511 с.
6. Чудинов, Б.С. Вода в древесине / Б.С. Чудинов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 270 с.
7. Уголев, Б.Н. Коэффициенты усушки древесины при действии растягивающих нагрузок / Б.Н. Уголев, В.П. Галкин, А.А. Калинина // Технология и оборудование для переработки древесины: сб. науч. тр. – Вып. 358. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. – С. 4–9.
8. Ugolev, B. N. Wood as a natural smart material. Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science, (2014) vol. 48, Number 3, S.553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.
9. Уголев, Б.Н. Многоформный эффект памяти древесины / Б.Н. Уголев, Г.А. Горбачева, С.Ю. Белковский – Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. – № 2(101). – С. 62–66.
10. Уголев, Б.Н. Экспериментальное исследование показателей эффекта памяти древесины. / Б.Н. Уголев, Г.А. Горбачева, С.Ю. Белковский // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. – № 2(101). – С. 66–69.
11. Уголев, Б.Н. Экспериментальные исследования влияния наноструктурных изменений древесины на ее деформативность / Б.Н. Уголев, В.П. Галкин, Г.А. Горбачева и др. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – № 7(90). – С. 124–126.

THE INFLUENCE OF TENSILE STRESSES ON THE CHANGE OF WOOD SHRINKAGE

Galkin V.P., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Sanaev V.G., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; **Ugolev B.N.**, Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Kalinina A.A., MSFU⁽¹⁾

rector@mgul.ac.ru, vgalkin@mgul.ac.ru, kalinina@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischy, Moscow reg., Russia

At removing the bounded adsorption water, wood shrinkage appears. If wood shrinkage occurs under load the coefficient of shrinkage varies, depending on the magnitude and direction of stresses. At tension shrinkage decreases and at compression it increases.

The effect of tensile load on the magnitude of shrinkage was investigated using experimental plant. Reduction of shrinkage by increasing the tensile stress is described by a linear dependence. At stresses approaching the maximum tensile strength of wood its shrinkage is less than 30 % of free shrinkage. The reduced value of shrinkage under load has been called the reduced shrinkage β' , and the ratio of the reduced shrinkage to free shrinkage β has been named the coefficient of reduction K' .

When the free shrinkage being used, the dependence of shrinkage on the moisture content of the wood includes two characteristic ranges; they are an initial nonlinear region with the moisture content of 15 % and the second one – linear with the MC less than 15 %. Within the first range both adsorption and microcapillary water is removed. Shrinkage results from a decrease in amount of adsorption water. Within the second region of dependency there is only adsorption water; therefore, the dependence of the shrinkage becomes linear.

Tensile load gives an additional nonlinearity to the dependence of the shrinkage on the moisture content. The beginning of the linear interval of the dependence is shifted to lower moisture content levels. When the load increases the value of shrinkage reduces and, moreover, the beginning of the linear range of moisture content also decreases.

The study of the shrinkage coefficient of loaded wood creates the basis for developing more accurate mathematical models to calculate the stress state of wood in the process of hydrothermal treatment.

Keywords: a coefficient of shrinkage, wood moisture content, shrinkage, stress, frozen strain.

References

1. Sergovskiy P.S., Rasev A.I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal treatment and preservation of wood]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1987. 360 p.
2. Ugolev B.N., Lapshin Yu.G., Krotov E.V. *Kontrol' napryazheniy pri sushke drevesiny* [Stresses control when drying]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1980. 208.
3. Galkin V.P. *Issledovanie vliyaniya temperatury na usushku mikrosrezov drevesiny* [Investigation of the influence of temperature on shrinkage mikrosrezov wood]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost']. V. 1, 2010. pp. 9-10.
4. Loskutov S.R. *Vzaimodeystvie drevesiny s fizicheskimi aktivnymi nizkomolekulyarnymi veshchestvami* [Interaction of wood with physically active low molecular weight substances]. Novosibirsk.: Izdatel'stvo SO RAN [FUE «Publishing House SB RAS»], 2004. 172 p.
5. Beynart I.I. i dr. *Kletochnaya stenka drevesiny i ee izmeneniya pri khimicheskom voz-deystvii* [Cell wall of wood and its changes during chemical exposure]. Riga, 1972. 511 p.
6. Chudinov, B. S. *Voda v drevesine* [Water timber]. Novosibirsk: Nauka, 1984. 270 p.
7. Ugolev B.N., Galkin V.P., Kalinina A.A. *Koeffitsienty usushki drevesiny pri deystvii rastyagivayushchikh nagruzok* [Shrinkage of wood under the action of tensile loads]. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny*. V. 358. Moscow: MGUL, 2011. pp. 4-9.
8. Ugolev B.N. Wood as a natural smart material. *Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science*, (2014) vol. 48, Number 3, pp. 553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.
9. Ugolev B.N., Gorbacheva G.A., Belkovskiy S.Yu. *Mnogoformovyy effekt pamyati drevesiny* [The multi-shape memory effect of wood]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*. 2014. № 2 (101). pp. 62–66.
10. Ugolev B.N., Gorbacheva G.A., Belkovskiy S.Yu. *Eksperimental'noe issledovanie pokazateley effekta pamyati drevesiny* [Experimental investigation of the wood memory effect quantities]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*. 2014. № 2 (101). pp. 66-69.
11. Ugolev B.N., Galkin V.P., Gorbacheva G.A., Kalinina A.A., Belkovskiy S.Yu. *Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya nanostrukturnykh izmeneniy drevesiny na ee deformativnost'* [Experimental study of the effect of nanostructured wood changes its deformability]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*. 2012. № 7 (90). pp. 124-126.