

СОДЕРЖАНИЕ

Обливин А.Н., Сапожников И.В., Лопатников М.В. Моделирование длительной прочности композиционных материалов на древесных наполнителях	6
Обливин А.Н., Сапожников И.В., Лопатников М.В. Влияние внешних факторов на длительную прочность композиционных материалов на древесных наполнителях	12
Запруднов В.И. Зависимость упругих постоянных древесно-цементного материала от объемного содержания компонентов	21
Руденко Б.Д. Принципы получения цементно-древесного композиционного материала	24
Тулузаков Д.В., Лапшин Ю.Г., Архипов А.С. Прочность при чистом сдвиге анизотропных материалов	28
Тулузаков Д.В., Спиринов Б.Л. Методика определения коэффициентов реологической модели ДСтП на этапе прессования	31
Иванкин А.Н., Панферов В.И., Фахретдинов Х.А., Вострикова Н.Л., Куликовский А.В., Голованова П.М. Наномикрокомпозиционные раневые покрытия на основе коллагена и карбоксиметилцеллюлозы	41
Иванкин А.Н., Панферов В.И., Фахретдинов Х.А., Вострикова Н.Л., Куликовский А.В. Химические вещества запаха растительных материалов на основе сосны и березы	46
Санаев В.Г., Уголев Б.Н., Галкин В.П., Калинина А.А., Аксенов П.А. Изменение усушки древесины при развитии сушильных напряжений	54
Галкин В.П., Мелехов В.И., Шульгин В.А., Санаев В.Г. Математическая модель системы контроля процесса сушки древесины в поле СВЧ	59
Полещук О.М. Системный анализ и обработка групповой экспертной информации на основе лингвистических переменных	65
Полещук О.М., Комаров Е.Г. Кластерный анализ групповой экспертной информации	75
Бурков В.Д., Гинкул Д.И. Исследование способов моделирования командной радиолинии командно-измерительной системы	82
Бурков В.Д., Гинкул Д.И. Процесс синхронизации синхронной радиолинии командно-измерительной системы	89
Бурков В.Д., Васильев В.П., Есаков В.А., Перминов С.В., Щукин Д.Г., Капранов Ю.С., Куфаль Г.Э., Бурлаков А.Б. Возможности создания обитаемой исследовательской базы на Луне	97
Карпачев С.П., Щербаков Е.Н., Шмырев Д.В. Плавуемость транспортных единиц из мягких контейнеров со щепой	102

ИЗМЕНЕНИЕ УСУШКИ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ РАЗВИТИИ СУШИЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В.Г. САНАЕВ, проф., зав. каф. древесиноведения МГУЛ, д-р техн. наук,

Б.Н. УГОЛЕВ, проф. каф. древесиноведения МГУЛ, д-р техн. наук,

В.П. ГАЛКИН, проф. каф. древесиноведения МГУЛ, д-р техн. наук,

А.А. КАЛИНИНА, вед. инж. каф. древесиноведения МГУЛ,

П.А. АКСЕНОВ, зав. лаб. каф. селекции, генетики и дендрологии МГУЛ, канд. с-х наук

rector@mgul.ac.ru, ugolev@mgul.ca.ru, vgalkin@mgul.ac.ru, kalinina@mgul.ac.ru, axenov.pa@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»

141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

В результате влияния градиентов влажности по толщине, сопровождающих камерную сушку древесины, в пиломатериалах возникают сушильные напряжения, изменяющие закономерности усушки древесины. В зависимостях свободной усушки от влажности, прослеживаются два участка: нелинейный, от начальной влажности до 15 %, на котором происходит удаление, в основном, микрокапиллярной воды, и практически линейный, при влажности менее 15 %, где удаляется адсорбционная влага. Вода, содержащаяся в древесине, образует промежуточные слабо взаимодействующие водородные связи. При деформировании влажной древесины возникают достаточно большие упругие и эластические деформации. В результате сушки деформированной древесины образуется замороженная деформация, исчезающая при повторном увлажнении древесины. Разница между значениями свободной усушки и величиной усушки, происходящей при растягивающей нагрузке, получила название замороженной усушки. Замороженная деформация складывается из трех составляющих: замороженных упругой и эластической деформаций, замороженной усушки и необратимой пластической деформации. Экспериментально установлено, что величина деформации от замороженной усушки сопоставима с замороженной упруго-эластической деформацией. При воздействии растягивающей нагрузки изменяется характер зависимости величины усушки от влажности древесины. Экспериментально установлено, что при нагрузках до половины предела прочности, характер зависимости редуцированной усушки от влажности древесины подобен усушке при отсутствии напряжений. В диапазоне влажности менее 15 % наблюдается линейный участок зависимости усушки. Нагрузки, превышающие половину предела прочности древесины, увеличивают протяженность участка нелинейной зависимости. Экспериментально показано, что зависимость замороженной усушки от величины нагрузки можно считать линейной. При напряжениях, близких к пределу прочности древесины, величина замороженной усушки достигает 70 % от свободной.

Ключевые слова: влажность древесины, усушка, напряжения, замороженные деформации.

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].

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

В зависимости 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 капил-

ляры переменного сечения [4]. 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.

Древесина представляет собой целлюлозный каркас, погруженный в лигнино-гемицеллюлозную матрицу. Во влажном состоянии древесина содержит связанную воду. Вода создает в древесине водородные связи [5]. Молекулы воды вклиниваются между соседними макромолекулами, разрывая часть межполисахаридных водородных связей и образуя водородные связи между молекулами воды и компонентами древесины [6]. В результате связь соседних макромолекул осуществляется через промежуточные слабо взаимодействующие подвижные молекулы воды. Вследствие этого снижаются механические

показатели. Древесина имеет свойства, характерные для волокнистого композита. При кратковременном нагружении влажной древесины возникают достаточно большие упругие и эластические деформации, величина которых определяется сравнительно малой жесткостью материала. Происходит разрушение одних водородных связей и образование других. Разгрузка влажной древесины способствует восстановлению прежних связей. Однако некоторые связи не восстанавливаются, что проявляется в виде пластических деформаций, образующихся при длительном действии нагрузки. При сушке древесины происходит удаление части связанной (адсорбционной) воды, образующей водородные связи с гидроксилами соседних макромолекул и повышение степени кристалличности целлюлозы. Древесина становится более жесткой. Разница между упруго-эластическими деформациями влажной и сухой древесины представляет собой замороженную деформацию, которую можно обнаружить при разгрузке. При увлажнении древесины замороженная деформация исчезает, т.е. является квази-остаточной, а пластическая деформация сохраняется.

Влажностная деформация сжатия – свободная усушка древесины β при действии растягивающих напряжений уменьшается за счет развития силовых упруго-эластических и пластических деформаций растяжения. Такая уменьшенная влажностная деформация получила название редуцированной или стесненной недопущенной усушки β^* [7, 8]. Разница между усушками β и β^* названа замороженной усушкой β_f . Следует заметить, что в статье [8], написанной по материалам Академической лекции ИАВС 2009 г., не полностью преодолены терминологические затруднения при переводе на английский язык и не отражены результаты исследований за истекшее пятилетие. Это учтено при дальнейшем изложении.

Свободная усушка β при приложении растягивающей нагрузки потенциально включает: замороженную усушку β_f ; компенсирующую влагообратимую силовую часть редуцированной усушки β^* (т.е. упруго-элас-

тическую деформацию сухой древесины ϵ_{ev2} ; замороженную упруго-эластическую деформацию ϵ_f и также влагообратимую собственно усушку β_s). Пластическая деформация невлагообратима, т.к. при увлажнении древесины не исчезает.

Наблюдаемая усушка (гипоусушка) β^* древесины, высушенной под растягивающей нагрузкой, состоит из усушки β_s и упруго-эластической деформации сухой древесины ϵ_{ev2} . Усадка древесины, высушенной под сжимающей нагрузкой, представляет собой гипер-усушку.

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 $\epsilon_{ev1} = 0,015$. (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 $\epsilon_{ev2} = 0,006$ после разгрузки и некоторой выдержки.

Для анализа деформационных превращений древесины нанесены: кривая свободной 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 $\beta^* = \beta_s + \epsilon_{ev2} = 0,056 + 0,006 = 0,062$ 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

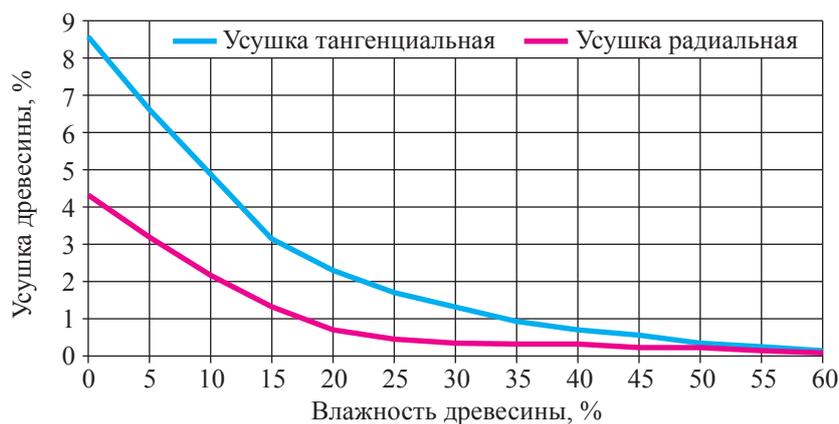


Рис. 1. Зависимость тангенциальной и радиальной усушки от влажности древесины
 Fig. 1. The dependence of the tangential and radial shrinkage of wood moisture

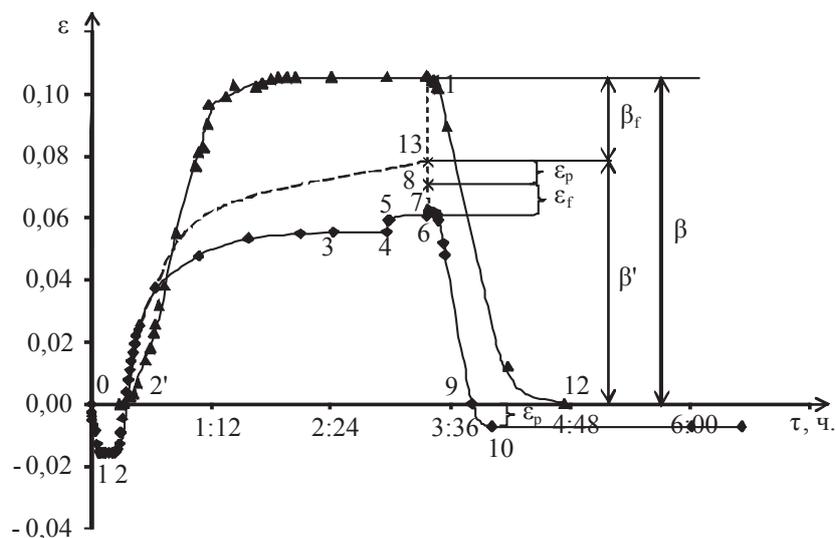


Рис. 2. Изменение деформации во время опыта (Ясень, растяжение, танг. $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W_{нач.}=86\%$, $W_{кон}=2\%$, $P=50\text{H}$)

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

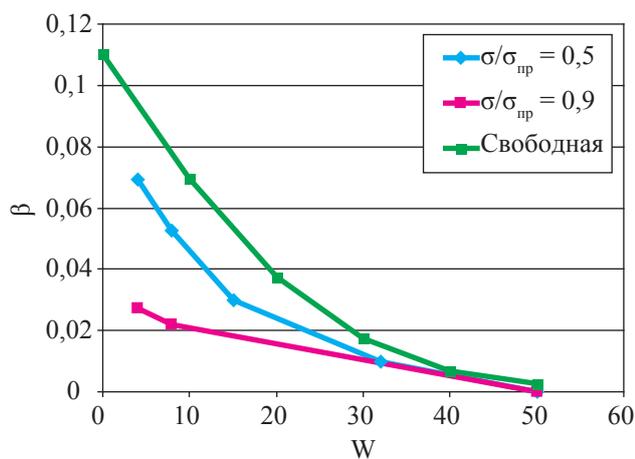


Рис. 3. Зависимость усушки от влажности древесины при различных значениях растягивающей нагрузки

Fig. 3. The dependence of shrinkage of the wood moisture at different values of tensile load

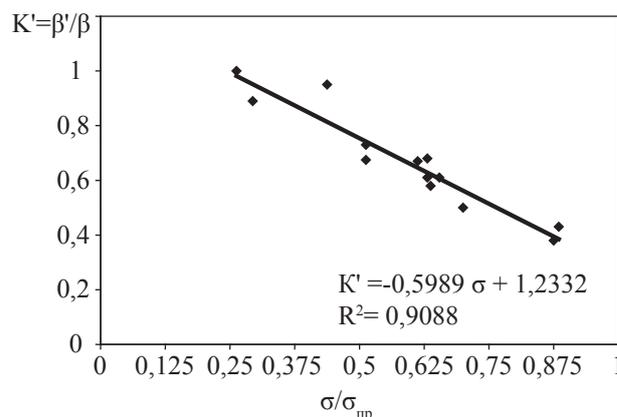


Рис. 4. Зависимость «редуцированной усушки» от напряжений (Ясень, растяжение, танг. $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W \geq W_{пн}$, $\sigma = 1,6\text{ МПа}$)

Fig. 4. Dependence «reduced shrinkage» of stresses (Ash, stretching, tango. $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W \geq W_{pn}$, $\sigma = 1,6\text{ МПа}$)

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 $\beta' = 0,076$. Отрезок 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. 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 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 увеличивается 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.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ.

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 пром-сть. – Вып. 1. – 2010. – С. 9–10.
4. Лоскутов, С.Р. Взаимодействие древесины с физически активными низкомолекулярными веществами / С.Р. Лоскутов. – Новосибирск: СО РАН, 2004. – 172 с.
5. Клеточная стенка древесины и ее изменения при химическом воздействии / Бейнарт И.И. и др. – Рига: 1972. – 511с.
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.: 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. Экспериментальные исследования влияния наноструктурных изменений древесины на ее деформативность / Уголев Б.Н., Галкин В.П., Горбачева Г.А., Калинина А.А., Белковский С.Ю. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – № 7(90). – С. 124–126.
10. Горбачева Г.А. Деформационные превращения древесины при изменении нагрузки, влажности и температуры / дис. ... канд. тех. наук: 05.21.05: защищена 12.10.04: утверждена 04.03.2005 / Г.А. Горбачева. – М., 2004.

CHANGE OF WOOD SHRINKAGE AT THE DEVELOPMENT
OF DRYING STRESSES

Sanaev V.G., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.); **Ugolev B.N.**, Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.); **Galkin V.P.**, Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.); **Kalinina A.A.**, Leading Engineer MSFU, **Aksenov P.A.**, Head. Lab. MSFU, Ph.D. (Agriculture)

rector@mgul.ac.ru, ugolev@mgul.ac.ru, vgalkin@mgul.ac.ru, kalinina@mgul.ac.ru, axenov.pa@mail.ru
Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytishi, Moscow reg., Russia

As a result of the influence of the moisture gradient through-the-thickness accompanying wood chamber drying, lumber is subject to stresses, changing patterns of wood shrinkage. Depending on the humidity of the free shrinkage, two sections can be traced – a nonlinear section with the the initial humidity of 15 %, which is removed mainly microcapillary water, and an essentially linear one, with at least 15 % humidity, which removes adsorption moisture. The water contained in the timber forms intermediate weakly-coupled hydrogen bonds. There are significant supple and elastic deformation during the deformation of wet wood. Deformed wood drying forms frozen deformation which disappears when rewetting wood. The difference between the value of the free shrinkage and shrinkage with a tensile load is called 'frozen shrinkage'. Frozen deformation consists of three components: the frozen supple and elastic deformations, frozen shrinkage and irreversible plastic deformation. It was established experimentally that the deformation of frozen shrinkage is comparable to frozen supple-elastic deformation. When subjected to a tensile load, the character of the dependence of shrinkage on the wood moisture changes. It was established experimentally that for loads up to half of the tensile strength, the dependence of the reduced shrinkage on the wood moisture content is similar to the shrinkage without stress. In the range of humidity of less than 15 % a linear portion of the dependence of shrinkage was observed. The loads exceeding half the tensile strength of wood increased length of the section of the nonlinear dependence. It has been experimentally shown that the dependence of the frozen shrinkage on the load can be considered linear. At voltages close to the tensile strength of wood shrinkage value of the frozen reaches 70 % of the free one.

Keywords: 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', 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', 1980. 208 p.
3. Galkin V.P. *Issledovanie vliyaniya temperatury na usushku mikrosrezov drevesiny* [Investigation of the influence of temperature on shrinkage mikrosrezov wood]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'*, V. 1, 2010. pp. 9–10.
4. Loskutov S.R. *Vzaimodeystvie drevesiny s fizicheski aktivnymi nizkomolekulyarnymi veshchestvami* [Interaction of wood with physically active low molecular weight substances]. Novosibirsk.: SO RAN, 2004. 172 p.
5. Beynart I.I. i dr. *Kletochnaya stenka drevesiny i ee izmeneniya pri khimicheskoy 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: sb. nauch. tr. 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, S.553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.
9. 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.
10. Gorbacheva G.A. *Deformatsionnye prevrashcheniya drevesiny pri izmenenii nagruzki, vlazhnosti i temperatury* [Deformation transformation of wood under load changes, humidity and temperature] diss. kand. tekhn. nauk Moscow, 2004.