

3. Одним из основных факторов, влияющих на строение древесины ели является состав древостоя. Процесс формирования годичных слоев у ели при одном и том же возрасте древостоев в одинаковых типах леса по разному идет в смешанных древостоях из ели и березы различного состава.

4. Оптимальные условия для формирования годичных слоев у ели создаются в древостоях состава 8Е2Б. В этом случае у деревьев ели формируются наиболее широкие годичные слои и с большим содержанием поздней древесины.

#### Список литературы

1. Ломов В. Д. Исследование формирования и строения годичных слоев сосны и березы при их произрастании в древостоях разного состава : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М. : 1979. 20 с.
2. Ломов В. Д., Янгуттов А. И. Влияние рекреационных нагрузок на лесоводственно-экологическую оценку состояния хвойных насаждений НП «Лосиный остров» // Вестник МГУЛеса – Лесной вестник. 2005. № 5. С. 114–118.
3. Мерзленко М. Д., Ломов В. Д. Анатомическое строение годичных слоев ели в связи с разной плотностью и размещением // Научные Труды МГУЛ. 1982. Вып. 139. С. 21–23.
4. Обыденников В. И., Коротков С. А., Ломов В. Д., Волков С. Н. Лесоводство : учебник для направления подготовки 35.03.01 «Бакалавр лесного дела». М. : МГУЛ, 2015. 272 с.
5. Обыденников В. И., Ломов В. Д. Лесоводство : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов 250400 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» по специальности 250401 «Лесоинженерное дело». М : МГУЛ, 2011. 282 с.
6. Пинчук А. М., Ломов В. Д. Влияние плотности сосновых молодняков на анатомические показатели древесины и накопление органической массы // Научные труды Московского лесотехнического института. М., 1973. № 49. С. 38–42.
7. Эсау К. Анатомия растений. М. : Мир. 1969. 660 с.
8. Яценко-Хмелевский А. А. Основы и методы анатомического исследования древесины. М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1954. 338 с.

УДК 630.812.14/812.211

**С. Р. Лоскутов,**

д. х. н., зав. лабораторией физико-химической биологии древесных растений, Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, РФ,  
[lrs@ksc.krasn.ru](mailto:lrs@ksc.krasn.ru)

**О. А. Шапченкова,**

к. б. н., старший научный сотрудник, Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, РФ,  
[shapchenkova@mail.ru](mailto:shapchenkova@mail.ru)

**А. А. Анискина,**

научный сотрудник, Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, РФ,  
[aniskina\\_a@ksc.krasn.ru](mailto:aniskina_a@ksc.krasn.ru)

**Zoltán Pásztor,**

директор Инновационного центра, Университет Шопрона, г. Шопрон, Венгрия,  
[pasztor.zoltan@uni-sopron.hu](mailto:pasztor.zoltan@uni-sopron.hu)

#### ГИГРОСКОПИЧЕСКАЯ ВЛАГА ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННЫХ ПОРОД: ИЗОТЕРМЫ СОРБЦИИ И ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

*В работе представлены сведения о гигроскопических свойствах древесины разных лиственных пород, произрастающих в Венгрии: параметры сорбции паров воды и данные термического анализа по неизотермической сушке древесины с гигроскопическим водосодержанием.*

**Ключевые слова:** древесина, гигроскопическая влага, сорбция, термический анализ.

**S. R. Loskutov,**

Doctor of Sciences, Head of laboratory of physico-chemical biology of woody plants, V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation,  
[lrs@ksc.krasn.ru](mailto:lrs@ksc.krasn.ru)

**O. A. Shapchenkova,**

Candidate of Sciences, Senior researcher, V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation,  
[shapchenkova@mail.ru](mailto:shapchenkova@mail.ru)

**A. A. Aniskina,**

Researcher, V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation, [aniskina\\_a@ksc.krasn.ru](mailto:aniskina_a@ksc.krasn.ru)

**Zoltán Pásztor,**

Doctor of Sciences, Director of Innovation center, University of Sopron, Sopron, Hungary, [pasztor.zoltan@uni-sopron.hu](mailto:pasztor.zoltan@uni-sopron.hu)

## HYGROSCOPIC MOISTURE OF WOOD OF DECIDUOUS TREE SPECIES: SORPTION ISOTHERMS AND THERMAL ANALYSIS

*The paper presents results on the hygroscopic properties of wood of different deciduous tree species of Hungarian origin: water vapor sorption parameters and thermal analysis data on non-isothermal drying of wood.*

**Keywords:** wood, hygroscopic moisture, sorption, thermal analysis.

Гигроскопичность древесины имеет первостепенное значение, так как влага влияет на все ее свойства [3]. Целью нашей работы была оценка гигроскопичности древесины ряда лиственных пород, произрастающих в Венгрии.

Исследовали древесину дуба (*Quercus petraea*), бука (*Fagus sylvatica*), граба (*Carpinus betulus*), робинии (*Robinia pseudoacacia*), липы (*Tilia platyphyllos*), ясеня (*Fraxinus ornus*), клена (*Acer campestre*), ольхи (*Alnus glutinosa*) и тополя (*Populus tremula*). Подготовка образцов, снятие изотерм сорбции влаги и термический анализ проведены по методикам, изложенным в работе [2].

Для расчета параметров сорбционной системы по изотермам сорбции использовали уравнения Брунауэра – Эммета – Теллера (БЭТ), Гугенгейма – Андерсона – де Бура (ГАБ), Френкеля – Холси – Хилла (ФХХ), Цимма – Лундберга (ЦЛ), теории объемного заполнения микропор (ТОЗМ) и Флори – Хаггинса (ФХ) [1]. Некоторые параметры приведены в таблице.

Т а б л и ц а

Параметры сорбции воды древесиной

Древесная порода	$u_m$ (ГАБ)	$C$ (ГАБ)	$S_{sp}$ (ГАБ)	$A = RT \ln(1/h)$	$u_{кл}$ (ЦЛ)	$E_c$ (ТОЗМ)	$E_{a(ср)}$ (ОФУ)
Дуб	0,029	8,78	103,7	3,3	0,045	884,0	78,8
Бук	0,031	8,19	113,3	3,68	0,035	669,6	89,3
Граб	0,032	7,56	114,6	3,24	0,033	677,1	64,7
Робиния	0,029	9,59	106,5	4,16	0,038	816,9	93,1
Липа	0,026	10,44	95,5	2,46	0,029	595,4	97,3
Ясень	0,034	8,24	121,3	3,7	0,044	791,6	76,9
Клен	0,033	7,06	120,3	3,43	0,049	940,8	88,9
Ольха	0,032	5,45	114,2	2,82	0,039	973,4	75,2
Осина	0,032	10,29	116,2	2,64	0,038	1074,7	76,6

**Примечание.**  $h \in [0,10; 0,30; 0,55; 0,65; 0,80; 0,95]$  – относительное давление водяного пара ( $h = P/P_0$ , где  $P$  – парциальное давление водяного пара,  $P_0$  – давление насыщенных паров воды) при температуре  $(20,0 \pm 1,5)$  °C;  $u$  – водосодержание древесины, г H<sub>2</sub>O/г СВ;  $u_m$  – емкость монослоя,  $u_{кл}$  – водосодержание древесины, при котором начинается образование водного кластера;  $C$  – константа, с помощью которой можно оценить среднюю теплоту адсорбции в первом адсорбционном слое;  $A$  – работа образования монослоя, кДж/моль;  $E_c$  – характеристическая энергия сорбции, Дж/моль;  $E_{a(ср)}$  – среднее значение энергии активации термодесорбции влаги (кДж/моль), рассчитанное по уравнению Озавы – Флинна – Уолла (ОФУ) из результатов термодесорбции в термогравиметрическом эксперименте (рис. 1а), как это было сделано для древесины лиственницы Гмелина в работе [6].

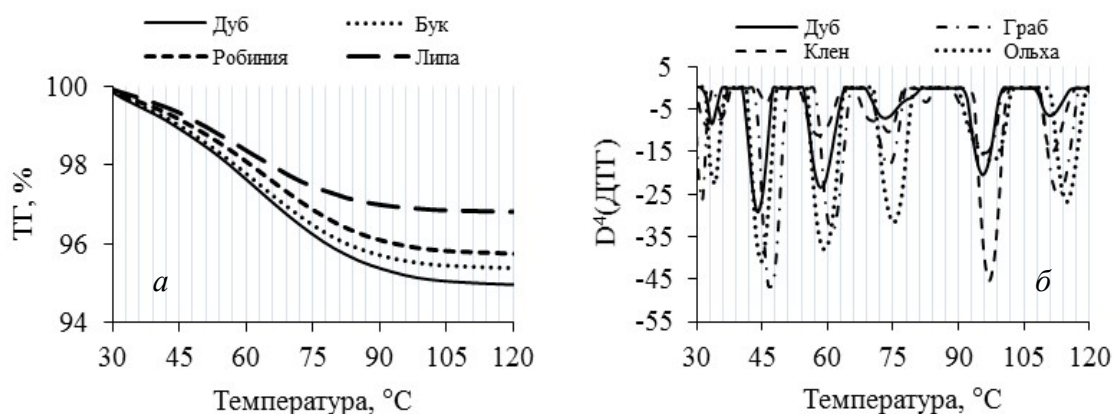
Содержание влаги в монослое указывает на количество молекул воды, которые прочно адсорбируются сорбционными центрами древесинного вещества [4]. По величине  $u_m$  (ГАБ) можно констатировать, что древесина ясеня и клена характеризовалась наибольшей доступностью сорбционных центров для влаги, а липы – наименьшей. Параметр  $C$  (ГАБ) отражает энергию связи молекул воды с веществом древесины.

Кластеризация молекул воды в древесине является результатом взаимодействия молекул между собой и с доступными гидроксильными группами в пределах клеточной стенки [5]. Среди изученных пород древесина липы отличается наиболее низким равновесным водосодержанием (0,029 г H<sub>2</sub>O/г СВ), при котором начинается образование водного кластера, тогда как для древесины дуба, ясеня и клена отмечаются сравнительно более высокие значения  $u_{кл}$ .

Характеристическая энергия сорбции паров воды древесиной изученных пород, рассчитанная в рамках модели ТОЗМ, варьировала значительно: для липы величина  $E_c$  оказалась минимальной и составила 595,4 Дж/моль, для осины – в 1,8 раза выше. Чем больше величина характеристической энергии сорбции, тем выше внутренние механические напряжения в древесине [1].

Кинетика процесса термодесорбции сорбированной влаги изучена с помощью изоконверсионного метода ОФУ [6]. В таблице представлены средние значения энергии активации термодесорбции, которые показывают, что влага более прочно связана с сорбционными центрами в древесине липы, наименее прочно – в древесине граба.

Сорбированная вода неоднородна по энергии связи с древесинным веществом, на что также указывают данные таблицы ( $C$ ,  $A$ ,  $E_c$ ,  $E_{a(ср)}$ ) и разложение ДТГ-контура с неразрешенной внутренней структурой, обусловленной перекрытием при испарении «соседних фракций» связанной воды на составляющие по методу высших производных (рис. 1б). Используя зависимости  $TГ = f(t)$  и  $\partial^4(\text{ДТГ})/\partial t^4 = v(t)$  (рис. 1а и 1б соответственно), были рассчитаны массовые доли индивидуальных «фракций» связанной воды для древесины каждой породы.



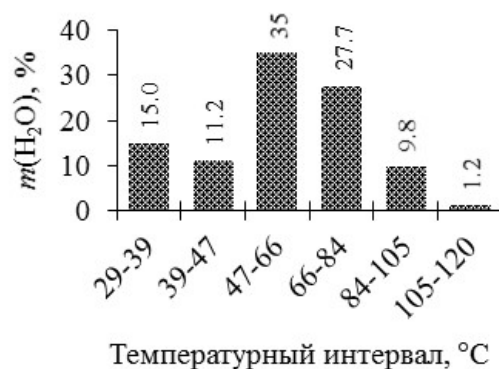
**Рис. 1. Термограмма неізотермічної сушки деревини:**

*a* –  $TГ = f(t)$ , при нагріванні со швидкістю  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мін}$  в атмосфері повітря;

*б* – четверта похідна швидкості втрати маси по температурі  $\partial^4(\text{ДТГ})/\partial t^4 = v(t)$ .

На рис. 2 показан усереднений по всім досліджуваним породам деревини «фракційний склад» гігроскопічної вологи, десорбуючої в різних температурних інтервалах.

Важною характеристикою зв'язаної води в деревині є ентальпія десорбції. В даному випадку – це ентальпія випаровування води в умовах програмуваного нагріву в експерименті по диференціальній скануючій калориметрії. Результати цих опитів показані на рис. 3.

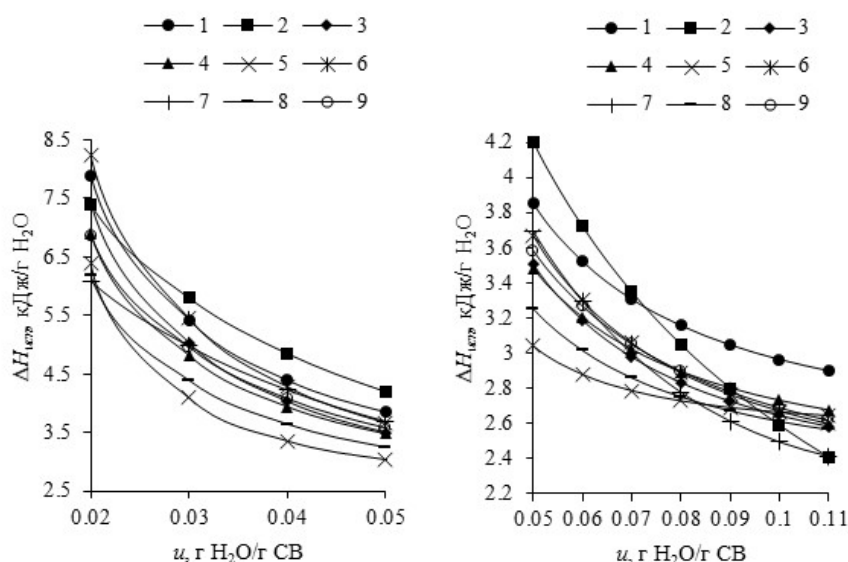


**Рис. 2. Усереднені по всім досліджуваним породам деревини масові частки «фракцій» гігроскопічної вологи, випаровуючої в різних температурних інтервалах**

**при нагріванні деревини в термогравіметричному опиті со швидкістю  $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{мін}$  в атмосфері повітря**

Из этого рисунка видно, что для каждой древесной породы характерен свой ход кривой, свидетельствующий о различии гигроскопических свойств.

Подводя итог, с помощью методов термического анализа и изотерм сорбции паров воды древесиной ряда лиственных пород получена количественная характеристика их гигроскопических свойств, которые могут быть востребованы древесиноведами, работающими в различных направлениях науки о древесине. При разработке процессов сушки и затрат энергии на удаление влаги наиболее приемлемыми данными являются зависимости, приведенные на рис. 3.



**Рис. 3. Зависимость энтальпии испарения связанной воды, найденная по результатам ДСК при нагревании древесины от 25 до 200 °С со скоростью 10 °С/мин в атмосфере воздуха: при водосодержании  $u \leq 0,05$  (слева) и при  $0,05 \leq u \leq 0,11$  г  $H_2O$ /г СВ (справа). 1 – дуб; 2 – бук; 3 – граб; 4 – робиния; 5 – липа; 6 – ясень; 7 – клен; 8 – ольха; 9 – осина**

#### Список литературы

1. Лоскутов С. Р. Взаимодействие древесины с физически активными низкомолекулярными веществами. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. 171 с.
2. Лоскутов С. Р., Анискина А. А., Шапченкова О. А., Тютюкова Е. А. Связанная вода в древесине лесобразующих пород Сибири: термический анализ и сорбция // Сибирский лесной журнал. 2019. № 3. С. 26–32.
3. Уголев Б. Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения : учебник для лесотехн. вузов / Б. Н. Уголев ; М-во образования Рос. Федерации. Моск. гос. ун-т леса. М. : МГУЛ, 2001. 340 с.
4. Oliveira G. H. H., Corrêa P. C., Santos E. S., Treto P. C., Diniz M. D. M. S. Evaluation of thermodynamics properties using GAB model to describe the desorption process cocoa beans // International Journal of Food Science & Technology. 2011. Vol. 46. P. 2077–2084.
5. Rawat S. P. S., Khali D. P. Clustering of water molecules during adsorption of water in wood // Journal of polymer science: Part B: Polymer Physics. 1998. Vol. 36. P. 665–671.
6. Tyutkova E. A., Loskutov S. R., Shashkin A. V., Benkova V. E. Thermal analysis of earlywood and latewood of larch (*Larix gmelini* (Rupr.) Rupr.) found along the Polar tree line: Correlation of wood destruction values with climatic factors // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2017. Vol. 130 (3). P. 1391–1397.

УДК 691.11

**Е. Н. Покровская,**

д. т. н., профессор кафедры КБС ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, РФ, [elenapokrovskaya@bk.ru](mailto:elenapokrovskaya@bk.ru)

**Д. Г. Михалёва,**

студентка 3 курса, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, РФ, [mikhaleva.dg@gmail.com](mailto:mikhaleva.dg@gmail.com)

#### УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОСТАВОВ

*Тенденции современной строительной индустрии предъявляют высокие требования по надежности и безопасности к древесине как строительному материалу. Особо актуальным становится вопрос увеличения долговечности деревянных конструкций, как для новых зданий и сооружений, так и для памятников деревянного зодчества. Одним из способов достижения увеличения срока службы конструкций из древесины является поверхностное модифицирование полифункциональными защитными составами. Благодаря данному мероприятию обработанный материал борется с проявлением своих негатив-*