

УДК 630.812.14/812.211

СВЯЗАННАЯ ВОДА В ДРЕВЕСИНЕ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД СИБИРИ: ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СОРБЦИЯ

С. Р. Лоскутов, А. А. Анискина, О. А. Шапченкова, Е. А. Тютюкова

Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

E-mail: lsr@ksc.krasn.ru, aniskina_a@ksc.krasn.ru, shapchenkova@mail.ru, katewood@inbox.ru

Поступила в редакцию 08.02.2019 г.

Рассмотрены гигроскопические свойства древесины сибирских пород. Изотермы сорбции паров воды древесиной лиственницы сибирской *Larix sibirica* Ledeb., сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., ели сибирской *Picea obovata* Ledeb., пихты сибирской *Abies sibirica* Ledeb., березы повислой *Betula pendula* Roth. и осины обыкновенной *Populus tremula* L. проанализированы на различных моделях сорбции: Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), Френкеля–Холси–Хилла (ФХХ), Цимма–Лундберга (ЦЛ), теории объемного заполнения микропор (ТОЗМ). Рассчитаны наиболее важные характеристики гигроскопических свойств исследованных образцов: емкость монослоя сорбированной воды и удельная внутренняя поверхность (u_m и $S_{уд}$ – по БЭТ); водосодержание и относительное давление паров воды, при которых в образцах древесины начинается образование водных кластеров (по уравнению ЦЛ); фрактальная размерность «сорбционной поверхности» (по модели ФХХ); характеристическая энергия сорбции (E_c) – по ТОЗМ. На основе результатов применения прецизионных методов термического анализа – термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) – установлена зависимость энергии активации десорбции воды от завершенности неізотермической сушки образцов древесины (по методу Озавы–Флинна–Уолла); определены максимальная скорость потери влаги и затраты энергии на удаление связанной воды при нагреве с постоянной скоростью. Установленные величины u_m , $S_{уд}$ и E_c свидетельствуют о значительных различиях в сорбции влаги древесиной изученных пород, которые достигали 8.8 % (u_m и $S_{уд}$) и 31.4 % (E_c). Анализ кинетики неізотермической сушки показал, что древесина березы, осины и лиственницы характеризовалась более высокими значениями энергии активации десорбции влаги по сравнению с сосной, елью и пихтой. Эти результаты хорошо согласуются с теплотой испарения влаги, определенной с помощью метода ДСК.

Ключевые слова: древесина, «сибирские» породы, анализ изотерм сорбции, термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия.

DOI: 1015372/SJFS20190304

ВВЕДЕНИЕ

Знание гигроскопических свойств материалов имеет большое практическое значение. В частности, для набухающих полимерных систем, таких как древесинное вещество, гидрофильность (гидрофобность) в значительной степени определяет их физико-механические свойства, устойчивость к биодegradации, термостабильность, режимы глубокой сушки, методы модифицирования и т. п. (Thybring et al., 2018). Поскольку заготавливаемая древесина разных пород, как правило, имеет неодинаковый хими-

ческий состав и, следовательно, разную степень гидрофильности (гидрофобности), постольку и параметры связанной воды могут быть неодинаковыми.

При анализе данных о сорбции паров воды и других низкомолекулярных жидкостей различными материалами – древесиной, синтетическими и природными полимерами, различными волокнистыми материалами, твердыми телами неорганической природы, пищевыми продуктами – используются около 100 уравнений (моделей сорбции). С. Van den Berg и S. Bruin (1981) выделили четыре основные группы, включаю-

щие уравнения, полученные на базе конкретных физических моделей сорбции (теории локализованной монослойной сорбции; полимолекулярной (полислойной) сорбции; так называемые растворные модели), и эмпирические уравнения. Многие из этих уравнений математически идентичны, хотя имеют различные физические предпосылки.

Нами проанализировано несколько десятков изотерм сорбции паров различных низкомолекулярных жидкостей (включая воду) древесиной. На основе этого анализа выбран ряд моделей сорбции, которые, по нашему мнению, наиболее «чувствительны» к различиям в строении и химическом составе древесинного вещества, что позволяет установить индивидуальные характеристики связанной воды в древесине той или иной породы.

На фоне имеющихся многочисленных сведений об этих свойствах для древесины различных ботанических видов, произрастающих в Европе (включая европейскую часть России), Северной и Южной Америке, Китае, тропической Африке (Majka, Olek, 2007; Fernández et al., 2014; Passarini et al., 2015; Gezici-Koc et al., 2017 и др.), подобные данные для основных лесобразующих видов Средней Сибири весьма фрагментарны.

В связи с этим цель нашего исследования – восполнить существующий пробел на основе экспериментальных данных о параметрах связанной воды в древесине «сибирских» пород из анализа изотерм сорбции паров воды, результатов термогравиметрии (ТГ/ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) испарения влаги в условиях программируемого нагрева древесины и анализа кинетики этого процесса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы древесины лиственницы сибирской *Larix sibirica* L., сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., ели сибирской *Picea obovate* L., пихты сибирской *Abies sibirica* L., березы повислой *Betula pendula* Roth. и осины обыкновенной *Populus tremula* L. заготовлены в одной ботанико-географической зоне Красноярского края (Красноярская лесостепь, насаждения II–III классов возраста) и подготовлены для анализа по методу, рекомендуемому в работе (Оболенская и др., 1991). В экспериментах использовали измельченную древесину – фракция ~0.1–0.3 мм.

Изотермы сорбции паров воды древесиной получены путем увлажнения воздушно-сухих образцов до равновесного водосодержания ($g \text{ H}_2\text{O}/g \text{ СВ}$ – сухого вещества древесины) в гигростатах при относительном давлении водяного пара h ($h = P/P_0$, где P – парциальное давление водяного пара, P_0 – давление насыщенных паров воды) 0.10; 0.30; 0.55; 0.65; 0.80; 0.95 и температуре (20.0 ± 1.5) °C. Навески образцов (100÷150 мг) помещали в алюминиевые тарелочки равномерным слоем толщиной 0.5–1.0 мм и устанавливали в гигростатах; повторность опытов пятикратная. Равновесную влажность образцов древесины определяли по ГОСТ 16483.7-71 (2006). Экспериментальные изотермы сорбции аппроксимировались гладкими функциями с помощью TableCurve 2D v. 5.01, которые использовались в дальнейшем для анализа сорбционных свойств исследованных образцов в интервале h от 0.040 до 0.960.

Термический анализ – термогравиметрия (ТГ/ДТГ) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) – осуществлен с помощью приборов TG 209 F1 и DSC 204 F1 (NETZSCH, Германия) соответственно. Образцы древесины, кондиционированные до постоянной влажности при температуре (20.0 ± 1.5) °C и относительной влажности воздуха 50÷55 %, проанализированы в атмосфере воздуха при следующих условиях. ТГ: скорость нагрева 10, 20 и 40 °C · мин⁻¹ от 25 до 700 °C, скорость потока защитного и продувочного газов 20 мл · мин⁻¹; масса образца 3.38÷8.93 мг, тигель Al₂O₃ цилиндрической формы. ДСК: скорость нагрева 10 и 40 °C · мин⁻¹ от 25 до 590 °C, скорость потока защитного и продувочного газов 40 мл · мин⁻¹; масса образца 1.05÷1.38 мг, тигель алюминиевый с перфорированной крышкой; эталон – пустой алюминиевый тигель. Обработка данных термического анализа осуществлялась с помощью пакета программ «NETZSCH. Proteus Thermal Analysis. 4.8.4».

Анализ кинетики неізотермической сушки древесины проводили на основе результатов термогравиметрии по методу Озавы–Флинна–Уолла (ОФУ) (Mamleev et al., 2004):

$$\ln(\beta) \cong C - 5.3305 - 1.052 \frac{E_a}{RT},$$

где E_a – энергия активации, T – температура, β – скорость нагрева, R – универсальная газовая постоянная, C – константа. Расчеты осуществлялись с помощью программ Excel 2007 и TableCurve 2D v. 5.01.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 в качестве примера показаны зависимости равновесного водосодержания u от относительного давления водяного пара h для древесины лиственницы и осины.

В табл. 1 представлены использованные нами модели сорбции и соответствующие им уравнения, выбор которых обусловлен тем, что в их основе лежат четкие физические представления о взаимодействии сорбата и сорбента (Адамсон, 1979). На рис. 2 показаны графические анаморфозы изотерм сорбции влаги древесиной разных пород в координатах уравнений из табл. 1.

Уже отмечено, что изотермы сорбции воды древесиной разных пород принадлежат к одной группе по классификации БДДТ. Вместе с тем соответствующие параметры использованных моделей, характеризующие сорбционные свойства древесины, существенно неодинаковы (табл. 2).

Из анализа изотерм сорбции воды древесиной вытекает следующее. Изменение емкости монослоя сорбированной воды при переходе от одной древесной породы к другой достигает ~12 %, что обусловлено различной долей и неодинаковой доступностью для молекул воды аморфных частей углеводного комплекса древесинного вещества исследованных пород. В этих же пределах изменяется и условная внутренняя удельная поверхность древесины, так как $S_{уд}$ прямо пропорциональна u_m ($S_{уд} = [u_m \cdot (M)^{-1}] \cdot a_m \cdot N_A \cdot 10^{-18}$), где M – молекулярная масса воды, a_m – «посадочная площадка» в монослое сорбированной воды, N_A – число Авогадро

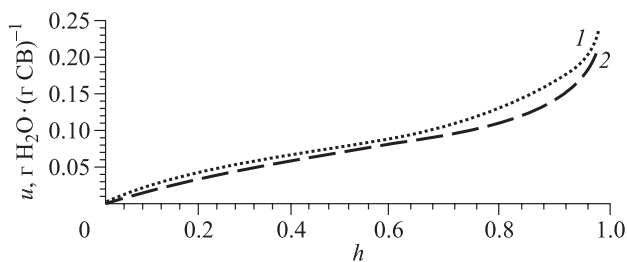


Рис. 1. Изотермы сорбции воды древесиной лиственницы (1) и осины (2) (h – относительное давление водяного пара при $T = 20$ °С).

Примечание. Для всех исследованных пород функции $u = f(h)$ относятся ко II типу по классификации С. Брунауэра, Л. Деминга, У. Деминга и Э. Теллера – БДДТ (Грег, Синг, 1984). Изменение стандартного отклонения при определении водосодержания по всем значениям h и всем древесным породам составило от $0.40 \cdot 10^{-3}$ до $2.55 \cdot 10^{-3}$ г H_2O · (г СВ) $^{-1}$, а соответствующее изменение коэффициента вариации – от 0.32 до 2.64 %.

(Колосовская и др., 1989). При этом образование водных кластеров в соответствии с теорией Цимма–Лундберга (Rawat, Khali, 1998; Davis, Elabd, 2013) начинается при очень близких значениях относительного давления водяного пара и соответствующем водосодержании, за исключением лиственницы. Эти показатели согласуются с вычисленной по уравнению ФХХ фрактальной размерностью «сорбционной поверхности», практически одинаковой для древесины всех пород. Вместе с тем анализ изотерм сорбции паров воды древесиной лиственницы, сосны, ели, пихты, березы и осины в рамках теории объемного заполнения микропор свидетельствует о существенно неодинаковой степени неравновесности структуры древесинного вещества разных пород: большому значению E_c (табл. 2) отвечает «менее равновесная» структура с большими внутренними напряжениями.

На рис. 3 представлены ТГ- и ДТГ-кривые десорбции воды из древесины исследуемых пород.

Изменение энергии активации термодесорбции влаги, рассчитанное по методу ОФУ, и результаты непосредственного измерения теплоты испарения воды в опыте ДСК представлены на рис. 4.

Сравнение средних значений E_a с соответствующими величинами $Q_{исп(2)}$ (см. рис. 4, Б) свидетельствует об адекватности метода ОФУ для количественной оценки затрат энергии при неизотермической десорбции влаги по данным термогравиметрии сушки древесины (рис. 5).

В табл. 3 представлены результаты термического анализа образцов древесины.

Параметры неизотермической сушки (исходное водосодержание проанализированных образцов было около u_m , см. табл. 2 и 3) свидетельствуют о существенно различном состоянии связанной влаги в древесине исследованных пород. Так, различие скорости потери влаги (DTG_{max}) образцами древесины в термогравиметрическом опыте достигает 40 %. Различие средних значений энергии активации термодесорбции (по ОФУ) колеблется от 11.9 до 48.4 кДж · моль $^{-1}$.

По затратам энергии $Q_{исп(2)}$ (см. рис. 4, Б) на удаление связанной влаги или (что то же самое) по энергии связи воды с древесинным веществом, отнесенной к единице массы испарившейся воды, древесные породы располагаются в ряду:

сосна < пихта < ель < лиственница <
< осина < береза.

Таблица 1. Перечень уравнений (моделей) сорбции, использованных для анализа сорбции воды древесиной «сибирских» пород

Модель	Уравнение
Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ)	$h/u (1 - h) = 1/u_m C + h (C - 1) / u_m C$
Френкеля–Холси–Хилла (ФХХ)	$\ln (1/h) = b \cdot (u_m/u)^s$
Цимма–Лундберга (ЦЛ)	$c_1 \cdot G_{II} = (1 - \phi_1) (\partial \ln \phi_1 / \partial \ln h)$
Теория объемного заполнения микропор (ТОЗМ)	$u = u_{max} \cdot \exp [- (-\Delta G / E_c)^n]$

Примечание. u – равновесное водосодержание древесины; u_m – емкость монослоя (Грег, Синг, 1984); C – константа, с помощью которой можно оценить среднюю теплоту адсорбции в первом адсорбционном слое (Адамсон, 1979); s – характеризует (в первом приближении) энергию адсорбции; b – константа (Грег, Синг, 1984); ϕ_1 – объемная доля сорбата; $(1 + (c_1 \cdot G_{II}))$ – среднее число молекул сорбата в кластере (Rawat, Khali, 1998; Davis, Elabd, 2013); u_{max} – максимальное гигроскопическое водосодержание древесины; ΔG – изменение свободной энергии Гиббса; E_c – характеристическая энергия сорбции; n – ранг уравнения ТОЗМ (Loskutov, 2000).

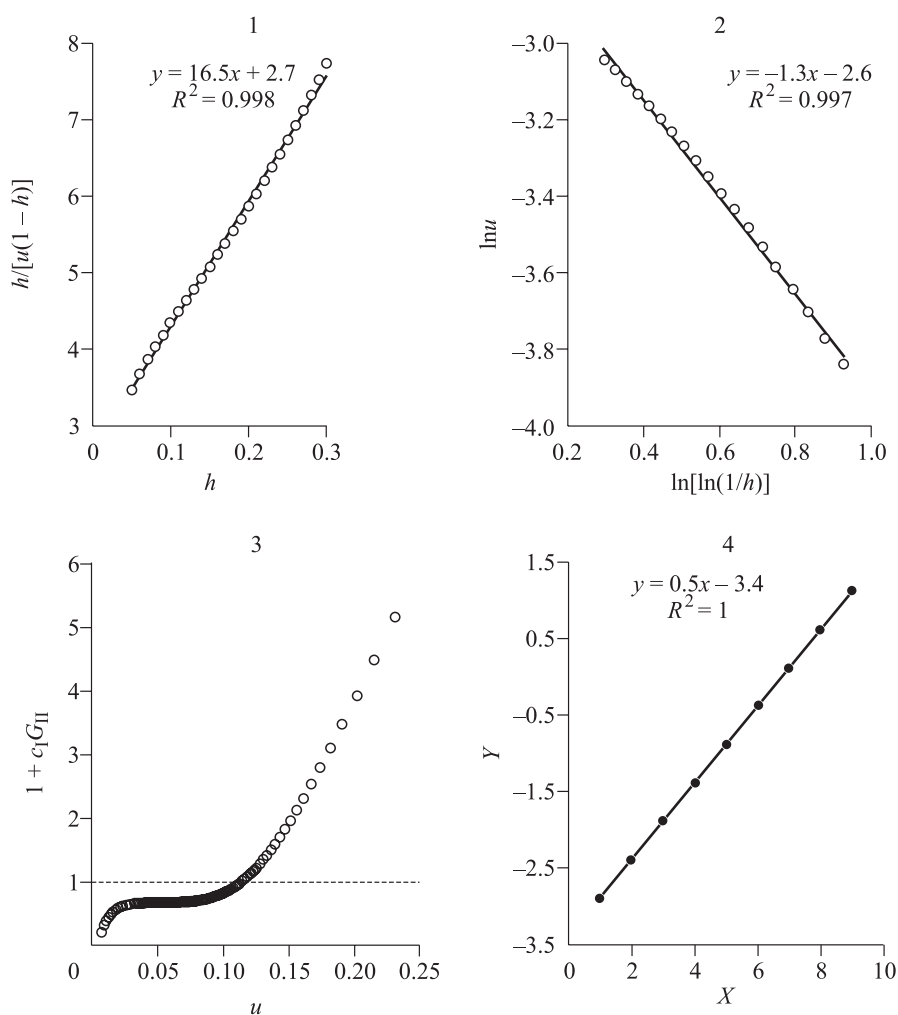


Рис. 2. Графические анаморфозы изотерм сорбции паров воды различной древесиной: 1 – лиственницы в координатах уравнения БЭТ; 2 – сосны в координатах уравнения БЭТ; 3 – ели в координатах уравнения ЦЛ; 4 – березы в координатах уравнения ТОЗМ: $X \equiv \ln [R \cdot T \cdot \ln (h^{-1})]$, где $R = 8.31$ Дж · (К · моль)⁻¹, $T = 293$ К; $Y = \ln \{-\ln [u \cdot (u_{max})^{-1}]\}$.

Таблица 2. Показатели сорбционных свойств древесины лиственницы, сосны, ели, березы и осины

Порода	$U_m, \%$ (БЭТ)	$S_{уд}, м^2 \cdot г^{-1}$ СВ (БЭТ)	(ЦЛ): начало образования кластеров воды в древесине при:		$U_{max}, \%$ при $h = 0.98$	ФР (ФХХ)	$E_c, Дж \cdot моль^{-1}$ (ТОЗМ)
			$U_h, \%$	h			
Лиственница	5.24	189.4	9.80	0.66	23.80	2.71	755
Сосна	4.78	172.6	11.75	0.77	22.34	2.76	1092
Ель	4.69	169.4	11.30	0.76	21.48	2.76	1088
Пихта	5.22	188.4	11.33	0.78	22.54	2.71	749
Береза	4.81	173.9	10.77	0.77	22.10	2.70	840
Осина	4.82	174.2	10.37	0.77	21.29	2.72	859

Примечание. ФР – фрактальная размерность «сорбционной поверхности», рассчитанная по методу (Pérez-Alonso et al., 2009) на основе уравнения ФХХ. $U_m = u_m \cdot 100 \%$; U_h – водосодержание древесины при относительном давлении пара h .

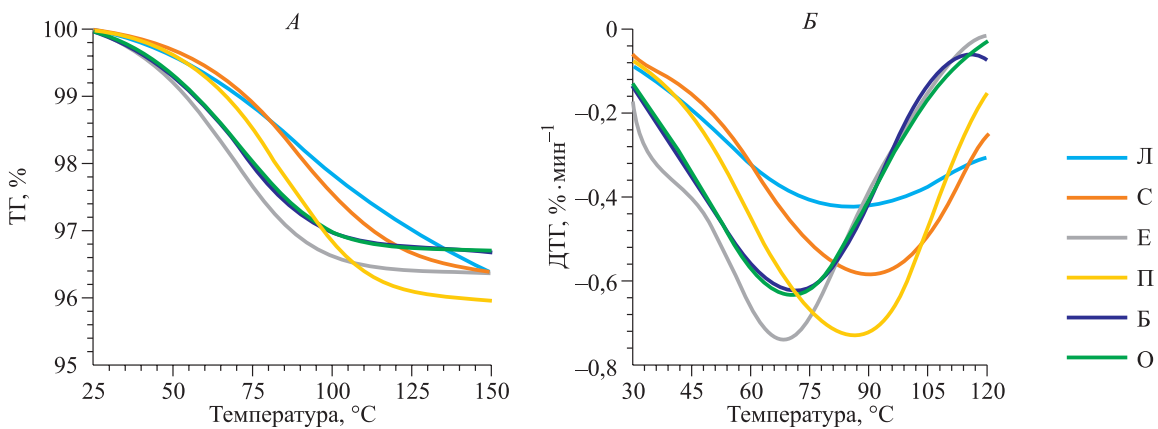


Рис. 3. Зависимости потери влаги (ТГ – (А)) и скорости потери влаги (ДТГ – (Б)) от температуры при скорости нагрева $10 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$. Здесь и на рис. 4, 5 Л – древесина лиственницы, С – сосны, Е – ели, П – пихты, Б – березы, О – осины.

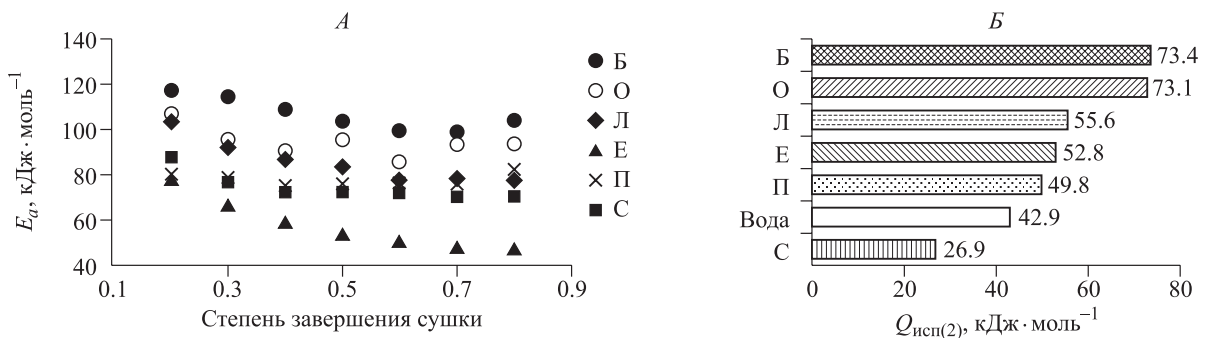


Рис. 4. Зависимость энергии активации неізотермической десорбции влаги от степени завершения процесса, рассчитанная по термогравиметрическим данным с помощью уравнения ОФУ (А). Абсолютные значения теплоты испарения воды, найденные при сушке образцов древесины в опытах ДСК (Б).

Древесина сосны выделяется в этом ряду (см. рис. 4, Б) тем, что $Q_{исп(2)}$ меньше удельной теплоты испарения чистой (не связанной) воды. Это объясняется «разбавлением» испаряющейся воды летучими низкомолекулярными органическими веществами, удельная теплота паро-

образования которых более чем на порядок ниже этого показателя для воды при соответствующей температуре.

Из анализа кинетики сушки по изоконверсионному методу ОФУ следует (см. рис. 4, А), что большими значениями энергии активации (при

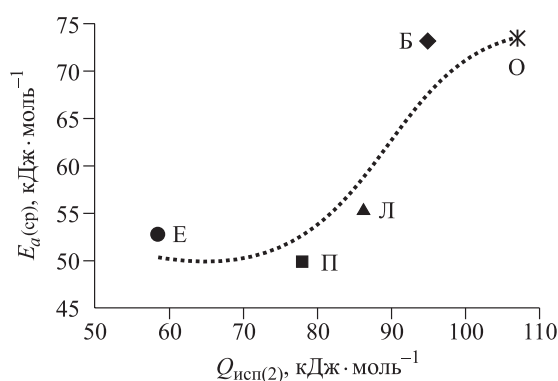


Рис. 5. Связь теплоты испарения влаги из древесины разных пород, найденной в опытах ДСК, со средней энергией активации неизоотермической сушки, рассчитанной по ТГ-кривым.

одной и той же степени завершенности процесса удаления влаги) характеризуется древесина с повышенным содержанием гемицеллюлоз: березы, осины и лиственницы (Шарков и др., 1976). Эти данные хорошо согласуются с теплотой испарения влаги, определенной с помощью метода ДСК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ изотерм сорбции паров воды в рамках ТОЗМ показал, что для лиственницы и пихты характерны более высокая концентрация активных центров сорбции в древесинном веществе и более низкие значения характеристической энергии сорбции по сравнению с сосной, елью, березой и осиной. Это свидетельствует о разной степени неравновесности структуры древесинного вещества исследованных пород.

Древесина лиственных пород (березы, осины) и лиственницы характеризуется более высокими величинами теплового эффекта испарения влаги и энергии активации неизоотермической десорбции влаги по сравнению с хвойными породами.

Результаты наших исследований свидетельствуют, что методы термогравиметрии (ТГ/ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии могут служить эффективным инструментом для изучения содержания и дифференциации состояния влаги в древесине разных пород.

Новые фактические данные о гигроскопических свойствах древесины основных лесобразующих пород Средней Сибири могут быть использованы переработчиками древесины, заготавливаемой в данном регионе, с целью разработки и усовершенствования технологий глубо-

Таблица 3. Параметры неизоотермической сушки древесины, найденные в экспериментах ТГ/ДТГ и ДСК

Порода	Потеря влаги, %	ДТГ _{max} , % · мин ⁻¹	T _{min} , °C	Q _{исп(1)} , Дж · г ⁻¹
Лиственница	4.31	0.42	69	133.2
Сосна	3.47	0.58	69	51.8
Ель	3.53	0.74	70	103.6
Пихта	3.90	0.73	62	107.9
Береза	3.46	0.62	66	141.1
Осина	3.22	0.63	68	130.8

Примечание. ДТГ_{max} – максимальная скорость испарения влаги, T_{min} – температура минимума эндотермы испарения влаги (ДСК), Q_{исп(1)} – тепловой эффект испарения влаги в опыте ДСК, отнесенный к единице массы влажного образца до начала нагревания.

кой сушки древесины, механической обработки, термического и химического модифицирования, био- и огнезащитной обработки древесины.

В исследовании использовались аналитические приборы и оборудование Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.
- ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности. М.: Стандартинформ, 2006. 3 с.
- Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир, 1984. 310 с.
- Колосовская Е. А., Лоскутов С. Р., Чудинов Б. С. Физические основы взаимодействия древесины с водой. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. 216 с.
- Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леоневич А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
- Шарков В. И., Куйбина Н. И., Соловьева Ю. П., Павлова Т. А. Количественный химический анализ растительного сырья. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 72 с.
- Davis E. M., Elabd Y. A. Water clustering in glassy polymers // *J. Phys. Chem. B*. 2013. V. 117. N. 36. P. 10 629–10 640.
- Fernández F. G., Esteban L. G., Palacios P., Simón C., García-Iruela A., Fuente J. Sorption and thermodynamic properties of *Terminalia superba* Engl. & Diels and *Triplochiton scleroxylon* K. Schum. through the 15, 35 and 50 °C sorption isotherms // *Eur. J. Wood Prod.* 2014. V. 72. Iss. 1. P. 99–106.
- Gezici-Koc O., Erich S. J. F., Huinink H. P., Van der Ven Leendert G. J., Adan O. C. G. Bound and free water distribution in wood during water uptake and drying as measured by 1D magnetic resonance imaging // *Cellulose*. 2017. V. 24. Iss. 2. P. 535–553.

- Loskutov S. R. Analysis of the wood sorption isotherm using the theory of micropore volume filling // *Holz-forschung*. 2000. V. 54. Iss. 3. P. 301–304.
- Majka J., Olek W. Effects of European beech (*Fagus sylvatica* L.) wood steaming on sorption ties and kiln-drying intensity // *Folia Forestalia Polonica. Ser. B*. 2007. Iss. 38. P. 55–65.
- Mamleev V., Bourbigot S., Le Bras M., Lefebvre J. Three model-free methods for calculation of activation energy in TG // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2004. V. 78. Iss. 3. P. 1009–1027.
- Passarini L., Malveau C., Hernández R. E. Distribution of the equilibrium moisture content in four hardwoods below fiber saturation point with magnetic resonance microimaging // *Wood Sci. Technol.* 2015. V. 49. Iss. 6. P. 1251–1268.
- Pérez-Alonso C., Fabela-Morón I. M. F., Guadarrama-Lezama A. Y., Barrera-Pichardo J. F., Alamilla-Beltrán L., Rodríguez-Huezo M. E. Interrelationship between the structural features and rehydration properties of spray dried manzano chilli sauce microcapsules // *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2009. V. 8. N. 2. P. 187–196.
- Rawat S. P. S., Khali D. P. Clustering of water molecules during adsorption of water in wood // *J. Polym. Sci. Part B: Polymer Physics*. 1998. V. 36. Iss. 4. P. 665–671.
- Thybring E. E., Kymäläinen M., Rautkari L. Experimental techniques for characterizing water in wood covering the range from dry to fully water saturated // *Wood Sci. Technol.* 2018. V. 52. Iss. 2. P. 297–329.
- Van den Berg C., Bruin S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects // *Water activity. Influences on food quality* / L. B. Rockland, G. F. Stewart (Eds.). N.-Y.: Acad. Press., 1981. P. 2–61.

BOUND WATER IN WOOD OF THE MAIN TREE SPECIES OF SIBERIA: THERMAL ANALYSIS AND SORPTION

S. R. Loskutov, A. A. Aniskina, O. A. Shapchenkova, E. A. Tyutkova

Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
V. N. Sukachev Institute of Forest, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
Akademgorodok, 50/28, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

E-mail: lsr@ksc.krasn.ru, aniskina_a@ksc.krasn.ru, shapchenkova@mail.ru, katewood@inbox.ru

This paper deals with the hygroscopic properties of the wood of the Siberian tree species. We analyzed Siberian larch *Larix sibirica* Ledeb., Scotch pine *Pinus sylvestris* L., Siberian spruce *Picea obovata* Ledeb., Siberian fir *Abies sibirica* Ledeb., drooping birch *Betula pendula* Roth., and wood samples of aspen *Populus tremula* L. using sorption models including the Brunauer–Emmet–Teller (BET), Frenkel–Halsey–Hill (FHH), Zimm–Lundberg (ZL), and micropore volume filling (MVF) theories along with accurate methods, namely thermogravimetry (TG), differential thermogravimetry (DTG) and differential scanning calorimetry (DSC). The isotherms of moisture sorption by wood were used to quantify the most important hygroscopic characteristics. We used BET to calculate monolayer capacity (u_m), specific inner surface area (S_{sp}) and ZL equation to find water vapor content and relative pressure when water clusters start to form in the wood samples, FHH model and MVF theory to obtain fractal dimension of «sorption surface» and characteristic sorption energy (E_c), respectively. Application of Ozawa–Flynn–Wall method to TG/DTG data allowed us to identify a dependence of water desorption activation energy on the stage of nonisothermal wood drying and to determine maximum moisture loss rate. Based on the measurement values obtained from DSC experiments, we found the energy spent for the removal of bound water when heating samples at a constant rate. The values of u_m , S_{sp} and E_c indicated that moisture sorption differed considerably (8.8 % for u_m and S_{sp} and 31.4 % for E_c) among the woody species of interest. A kinetical analysis revealed that the wood of birch, aspen, and larch had higher values of moisture desorption activation energy as compared to pine, spruce and fir. These differences agreed well with the values for moisture evaporation heat determined by DSC method.

Keywords: wood, Siberian species, analysis of isotherms of sorption, thermogravimetry, differential scanning calorimetry.

How to cite: Loskutov S. R., Aniskina A. A., Shapchenkova O. A., Tyutkova E. A. Bound water in wood of the main tree species of Siberia: thermal analysis and sorption // *Sibirskiy Lesnoj Zhurnal* (Sib. J. For. Sci.) 2019. N. 3. P. 26–32. (in Russian with English abstract).