

3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

УДК 674.047.3

Н.Г. Иванов, А.М. Артеменков

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И ТЕКУЩЕЙ ВЛАЖНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В КАЧЕСТВЕ ГРАДИЕНТОМЕРА

Введение. В ГОСТ 19773-84 «Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия» режим сушки характеризуется состоянием сушильного агента перед подачей его на высушиваемый материал. Оно изменяется по соответствующим ступеням в зависимости от переходной влажности древесины. Влажность пиломатериалов в процессе сушки должна проверяться периодическим взвешиванием контрольных образцов или дистанционными приборами. Применение систем автоматического регулирования регламентируется только для контроля и поддержания состояния сушильного агента в камере с использованием дистанционных психрометров.

Современные сушильные камеры для пиломатериалов в большинстве случаев оснащаются системами дистанционного контроля не только параметров агента сушки, но и влажности пиломатериалов. Знание влажности пиломатериалов в любой момент необходимо не только для принятия решения о завершении процесса при достижении требуемой конечной влажности, но и для проведения цикла сушки в автоматическом режиме в соответствии с заданными ступенями.

Системы дистанционного измерения влажности пиломатериалов в сушильных камерах периодического действия относятся к кондуктометрическим способам измерения влажности.

Рекомендации по установке электродов датчиков влажности излагаются в соответствующих руководствах по эксплуатации таких систем измерения влажности и в рекомендациях EDG [Welling, 1994].

Кондуктометрический способ измерения влажности пиломатериалов не лишён отрицательных сторон. Это локальное измерение влажности, зависимость от температуры и плотности древесины в точке замера, а также индивидуальных особенностей древесины, трудоёмкость установки датчиков в пиломатериалы.

Использование систем дистанционного контроля влажности даёт вполне адекватную информацию не только об изменении текущей влажности пиломатериалов, но и о скорости изменения влажности в процессе сушки.

Несмотря на развитие систем дистанционного контроля влажности пиломатериалов, актуальной задачей при проведении процесса сушки является контроль перепада влажности по толщине пиломатериалов, что, в свою очередь, позволяет контролировать развитие внутренних напряжений вследствие разности усушки различных слоёв пиломатериалов в процессе сушки.

Измерение поверхностной влажности пиломатериалов посредством дистанционной системы измерения влажности древесины, применяемой в сушильных камерах, не лишено некоторых технических затруднений, связанных с конструкцией датчика влажности и трудоёмкостью его установки на поверхности пиломатериалов.

Процесс сушки протекает тем быстрее, чем больше градиент влажности по толщине пиломатериалов, температура и избыточное давление паровоздушной смеси внутри самой древесины [Бывших, Дьяконов, 1962]. Значение перепада влажности и толщины пиломатериалов позволяет определить градиент влажности в любой момент времени, а значит вести за ним контроль, для чего в ЦНИИМОД был разработан специальный прибор дистанционного действия – градиентомер влажности ГВ-1 [Бывших, Дьяконов, 1962]. В приборе ГВ-1 применялось до десяти изолированных электродов, то есть до десяти датчиков влажности кондуктометрического типа. Сочетание нескольких таких датчиков, установленных в древесину на разную глубину, даёт возможность получить послойную влажность пиломатериалов непосредственным измерением и контролировать развитие внутренних напряжений вследствие разности усушки.

В большинстве конвективных сушильных камер периодического действия, эксплуатируемых на деревообрабатывающих предприятиях, для контроля относительной влажности воздуха используются датчики равновесной влажности древесины (датчик ЕМС), основанные на измерении электрического сопротивления целлюлозной пластинки или пластинки из

шпона древесины лимба в зависимости от её влажности. Основное достоинство такого датчика заключается в создании возможности автоматизации процесса сушки с учётом фактической влажности пиломатериалов, которая измеряется кондуктометрическим способом.

Тот факт, что поверхностная влажность пиломатериалов достаточно быстро достигает устойчивой влажности при десорбции, которая в условиях применяемых режимов равна равновесной влажности древесины, позволит принимать результат измерения равновесной влажности древесины датчиком ЕМС за поверхностную влажность всех пиломатериалов, находящихся в сушильной камере, так как датчик ЕМС установлен в значительно турбулизированном потоке воздуха на входе в штабель, и поэтому диапазон изменения равновесной влажности древесины по высоте штабеля предполагается несущественным и во внимание не принимается.

В связи с развитием техники контроля и управления процессом сушки пиломатериалов существует реальная возможность использования штатных систем дистанционного измерения влажности древесины и параметров режима сушки не только для ведения процесса сушки по перепаду влажности, но и для оценки внутренних напряжений в пиломатериалах с использованием датчиков влажности древесины с изолированными электродами, установленными на середину толщины пиломатериалов.

Основываясь на приведённых данных, можно говорить о том, что, несмотря на некоторые недостатки гигрометрического способа определения относительной влажности воздуха с использованием датчиков ЕМС, сушильные камеры, оснащённые такими системами, широко распространены в России и будут эксплуатироваться ещё достаточно долго. Поэтому адаптация существующих режимов сушки, созданных под использование психрометрического метода определения параметров агента сушки, и разработка новых режимов под использование гигрометрического метода по датчикам ЕМС является актуальной задачей, решение которой позволит совершенствовать технику проведения процесса сушки пиломатериалов и повысить её эффективность.

Цель исследования заключалась в проверке гипотезы, что древесина контактирующих непосредственно с сушильным агентом слоёв достигает равновесной влажности древесины, соответствующей заданным параметрам режима.

Для достижения поставленной цели сформированы следующие задачи:

1. Выяснить, достигает ли образец древесины некоторой постоянной массы в процессе сушки его при температуре менее 100 °С;

2. Установить, является ли достигнутая при заданных параметрах агента сушки постоянная масса массой образца в абсолютно сухом состоянии;
3. Установить, является ли факт прекращения уменьшения массы образца древесины фактом достижения равновесной влажности древесины при соответствующих параметрах режима сушки;
4. Оценить время и скорость достижения равновесного состояния при различных температурах агента сушки.

Материалы, оборудование и приборы.

1. Климатическая камера СМ 5/100-250 ТВО для создания и поддержания заданного режима сушки;
2. Сушильный шкаф с автоматическим поддержанием температуры воздуха до 150 °С;
3. Электронные весы MW-150T с дискретностью 0,005 г;
4. Штангенциркуль с точностью измерения до 0,1 мм;
5. Бюкса алюминиевая с притёртой крышкой – 10 шт.;
6. Образцы древесины из берёзового шпона в виде прямоугольных пластинок размерами 22×43×1,5 мм, соответствующими размерам целлюлозной пластинки С001573 датчика ЕМС и влажностью более 30%.

Методика исследования.

1. Образцы древесины из берёзового шпона в виде прямоугольных пластинок размерами 22×43×1,5 мм вымачиваются в чистой водопроводной воде в лабораторных условиях в течение нескольких суток до достижения ими абсолютной влажности более 30%;
2. Чистые пустые бюксы с крышками нумеруются и взвешиваются на электронных весах MW-150T;
3. Случайным образом отбираются 10 сырых образцов, с поверхности которых бумажным полотенцем удаляется излишняя влага, помещаются в 10 подготовленных бюкс по одному в каждую бюксу и закрываются крышками;
4. Каждая бюкса с образцом взвешивается на весах для определения начальной массы m_1 , г до начала процесса сушки;
5. Бюксы открываются, помещаются в климатическую камеру и сушатся при заданных температуре и относительной влажности воздуха до достижения постоянной массы. Взвешивание бюкс с образцами производится каждые 30 мин на электронных весах MW-150T. Перед взвешиванием, сразу после извлечения из климатической камеры, бюксы закрываются крышками;

6. После достижения постоянной массы при сушке в климатической камере образцы досушиваются в сушильном шкафу при температуре 103 ± 2 °С до постоянной массы, которая принимается за массу в абсолютно сухом состоянии, m_2 , г.

Режим сушки. Всего проведено три серии опытов при различной температуре и относительной влажности воздуха. В каждом опыте относительная влажность воздуха ϕ принимается такой, чтобы при заданной температуре равновесная влажность древесины соответствовала по диаграмме П.С. Серговского $W_p = 8\%$ [Расев, 2010]. Режимы по каждому опыту представлены в табл. 1.

Снятые с диаграммы значения относительной влажности воздуха ϕ уточнены расчётом по формулам И.В. Кречетова [1997]. Равновесной влажности древесины $W_p = 8\%$ соответствуют следующие расчётные значения относительной влажности воздуха ϕ' : при $t = 50$ °С $\phi' = 49,23\%$; при $t = 55$ °С $\phi' = 50,96\%$; при $t = 60$ °С $\phi' = 52,77\%$.

Таблица 1

Режимы сушки в климатической камере

Drying modes in the climate chamber

Параметр режима	Номер опыта		
	1	2	3
Температура воздуха t , °С	50	55	60
Относительная влажность воздуха ϕ , %	48	49	51
Равновесная влажность древесины W_p , %	8	8	8

Абсолютная Δ_ϕ и относительная δ погрешность определения относительной влажности воздуха ϕ по диаграмме П.С. Серговского по отношению к относительной влажности воздуха ϕ' , рассчитанной по формулам И.В. Кречетова, определяется по формулам (1) и (2) соответственно:

$$\Delta_\phi = |\phi - \phi'|, \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\Delta_\phi}{\phi'} 100. \quad (2)$$

Результаты расчётов представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты оценки точности определения относительной влажности
воздуха при заданных температурах**

**The results of the accuracy assessment of determining the air relative humidity
at specified temperatures**

Параметр	Температура воздуха, °С		
	50	55	60
Относительная влажность воздуха по диаграмме П.С. Серговского φ , %	48	49	51
Относительная влажность воздуха по формуле И.В. Кречетова φ' , %	49,23	50,96	52,77
Абсолютная погрешность Δ_{φ} , %	1,23	1,96	1,77
Относительная погрешность δ , %	2,50	3,85	3,35

Для значений относительной влажности воздуха, принятых в эксперименте (п. 1, табл. 2), по формулам И.В. Кречетова [1997] рассчитаны соответствующие значения равновесной влажности древесины W'_p . Также, в соответствии с паспортом климатической камеры, точность поддержания относительной влажности воздуха в контрольной точке датчиком ИЛТВ-206/М1-02 составляет $\pm 5\%$. Следовательно, при заданных значениях φ действительное значение относительной влажности и соответствующее ему действительное значение равновесной влажности древесины W'_p будут находиться в следующих диапазонах:

- $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 48 \pm 5\%$, $W'_p = 7,83\%$: $\varphi = 43 \dots 53\%$, $W'_p = 7,14 \dots 8,52\%$;
- $t = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 49 \pm 5\%$, $W'_p = 7,74\%$: $\varphi = 44 \dots 54\%$, $W'_p = 7,06 \dots 8,41\%$;
- $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 51 \pm 5\%$, $W'_p = 7,77\%$: $\varphi = 46 \dots 56\%$, $W'_p = 7,10 \dots 8,43\%$.

Обработка результатов экспериментов. По полученным в результате проведения экспериментов массам образцов до и после высушивания рассчитаны абсолютная влажность образцов W_i , средняя влажность по десяти образцам $\bar{W}$, среднее квадратическое отклонение влажности образцов S и дисперсия S^2 .

Эксперимент проводился при трёх различных температурах 50, 55, 60 °С с одинаковой периодичностью взвешивания, и соответствующие дисперсии влажности S^2 различаются. Для подтверждения гипотезы, что

разброс значений влажности при различных температурах высушивания одинаковый, выполнена проверка однородности дисперсий по G -критерию Кохрена [Пижулин, Розенблит, 1984].

Объёмы каждой из трёх выборок одинаковы и равны десяти. По уровню значимости $q = 0,05$, числу степеней свободы $f = n - 1 = 10 - 1 = 9$ и количеству выборки $m = 3$ из таблицы значений G -критерия Кохрена [Пижулин, Розенблит, 1984] принимаем $G_{\text{табл}} = 0,62$.

Результаты исследования. Значения средней влажности образцов $\bar{W}$, среднего квадратического отклонения влажности S , дисперсий влажности S^2 и расчётного G -отношения $G_{\text{расч}}$ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влажность образцов в процессе сушки

Moisture content of the specimens during the drying process

Температура воздуха, °С	Параметры	Время, мин						
		0	30	60	90	120	150	180
50	$\bar{W}$	149,370	54,640	9,940	8,700	8,770	8,700	8,700
	$\pm S$	11,690	11,770	1,020	0,630	0,630	0,710	0,710
	S^2	136,547	138,501	1,035	0,391	0,402	0,509	0,509
55	$\bar{W}$	163,560	39,990	8,610	7,710	7,910	7,990	7,980
	$\pm S$	12,930	12,240	1,800	1,120	0,780	1,150	1,050
	S^2	167,091	149,859	3,223	1,263	0,606	1,315	1,109
60	$\bar{W}$	140,190	14,840	7,120	7,290	7,040	7,280	7,430
	$\pm S$	9,890	6,920	1,340	0,980	0,830	0,850	0,720
	S^2	97,870	47,928	1,797	0,961	0,689	0,715	0,520
$G_{\text{расч}}$		0,416	0,446	0,532	0,483	0,406	0,518	0,519
$G_{\text{табл}}$		0,62						

Поскольку для всех периодов эксперимента $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}} = 0,62$, гипотеза об одинаковом разбросе значений влажности образцов при различных температурах сушки принимается.

Из табл. 3 видно, что образцы достигают устойчивой влажности начиная с девяностой минуты процесса сушки в климатической камере. Определяя среднюю влажность образцов по последующим четырём замерам (от

90 до 180 мин) и соответствующее среднее квадратическое отклонение, получаем следующие результаты:

- при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$: $W = (8,72 \pm 0,04)\% = (8,68...8,76)\%$;
- при $t = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$: $W = (7,90 \pm 0,13)\% = (7,77...8,03)\%$;
- при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$: $W = (7,26 \pm 0,16)\% = (7,10...7,42)\%$.

Диапазоны равновесной влажности древесины, рассчитанные для условий эксперимента, и диапазоны влажности образцов древесины, рассчитанные по последним четырём замерам, представлены на рис. 1.

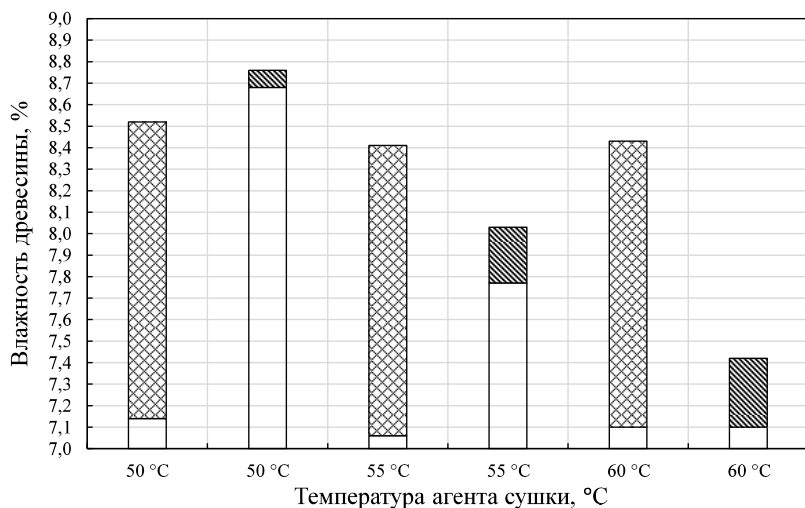


Рис. 1. Диапазоны равновесной влажности древесины
Fig. 1. The ranges of equilibrium moisture content of wood

При температуре $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ средняя достигнутая влажность образцов оказалась больше ожидаемой равновесной влажности древесины, и диапазоны их изменения не пересекаются.

При температурах 55 и $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ не только средняя влажность образцов, но и диапазон её изменения полностью лежат внутри диапазона изменения равновесной влажности древесины.

Абсолютное отклонение влажности образцов древесины от расчётного действительного значения равновесной влажности древесины и относительная погрешность составляют:

- при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$: $\Delta W_p = |8,72 - 7,83| = 0,89\%$; $\delta = \frac{0,89}{7,83} \cdot 100 = 11,4\%$;

- при $t = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$: $\Delta W_p = |7,90 - 7,74| = 0,16\%$; $\delta = \frac{0,16}{7,74} 100 = 2,1\%$;
- при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$: $\Delta W_p = |7,26 - 7,77| = 0,51\%$; $\delta = \frac{0,51}{7,77} 100 = 6,6\%$.

Выводы. По результатам проведённого эксперимента можно утверждать, что поставленные задачи решены успешно.

1. В процессе сушки при температурах менее $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ образцы достигают некоторой постоянной массы, что также выражается в прекращении изменения влажности древесины в процессе сушки;

2. Достигнутая при заданных параметрах агента сушки постоянная масса не является массой образца в абсолютном сухом состоянии, так как при последующей досушке их в сушильном шкафу при температуре $103 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ масса образцов продолжала снижаться;

3. Факт прекращения уменьшения массы образца при сушке в климатической камере можно считать фактом достижения равновесной влажности древесины при соответствующих параметрах агента сушки;

4. При всех экспериментальных температурах образцы древесины достигали равновесия начиная с девяностой минуты процесса сушки.

По результатам проведённой экспериментальной работы можно рекомендовать следующее:

1. При проведении экспериментальных исследований с использованием климатического оборудования подбор значений относительной влажности воздуха по заданным температуре и равновесной влажности древесины следует выполнять по формулам И.В. Кречетова [1997];

2. Действительно представляется возможным использование в качестве градиентомера штатной системы определения относительной влажности воздуха по температуре и равновесной влажности древесины (ЕМС) в совокупности с дистанционной системой измерения текущей влажности пиломатериалов в современных сушильных камерах;

3. Дальнейшее исследование в этом направлении необходимо проводить в производственных условиях на действующих сушильных камерах.

Полученные результаты исследования позволили подтвердить гипотезу о возможности создания и использования методики измерения величины внутренних напряжений с помощью штатных систем контроля параметров агента сушки и влажности древесины в современных сушильных камерах.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бывших М.Д., Дьяконов К.Ф. Контрольно-измерительные и регулирующие приборы камерной сушки древесины. Архангельск: Архангельское книжное издательство, 1962. 92 с.

Кречетов И.В. Сушка древесины. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Бриз, 1997. 496 с.

Пижурич А.А., Розенблит М.С. Исследование процессов деревообработки. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 232 с.

Расев А.И. Сушка древесины: учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 416 с.

Welling J. EDG-Recommendation. Assessment of drying quality of timber: Pilot edition, 1994. 27 p.

References

Byvshikh M.D., Dyakonov K.F. Kontrol'no-izmeritel'nye i reguliruyushchie pribory kamernoy sushki drevesiny. Arkhangelsk: Arkhangelskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1962. 92 p. (In Russ.)

Krechetov I.V. Sushka drevesiny. Izd. 4-e, pererab. i dop. Moscow: Briz, 1997. 496 p. (In Russ.)

Pizhurin A.A., Rozenblit M.S. Issledovanie protsessov derevoobrabotki. Moscow: Lesn. prom-st', 1984. 232 p. (In Russ.)

Rasev A.I. Sushka drevesiny: uchebnoe posobie. St. Petersburg: Lan', 2010. 416 p. (In Russ.)

Welling J. EDG-Recommendation. Assessment of drying quality of timber: Pilot edition. 1994. 27 p.

Материал поступил в редакцию 25.04.2024

Иванов Н.Г., Артеменков А.М. О возможности использования дистанционных систем контроля параметров режима и текущей влажности древесины в качестве градиентометра // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 335–345. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.335-345

В статье рассматривается возможность использования методики измерения величины внутренних напряжений в древесине в процессе сушки при помощи штатных систем контроля параметров агента сушки. Выдвигается гипотеза о возможности контроля влажности поверхности пиломатериалов датчиками равновесной влажности древесины. Приводятся результаты эксперимента для выявления скорости и точности достижения образцами значений равновесной влажности древесины.

Ключевые слова: обработка древесины, сушка древесины, системы контроля параметров сушки древесины.

Ivanov N.G., Artemenkov A.M. On the possibility of using remote control systems for the parameters of the regime and the current wood moisture content as a gradiometer. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 335–345 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.335-345

The article considers the possibility of using the method of measuring the value of internal stresses in wood during drying process using standard control systems for the parameters of the drying agent. The hypothesis about the possibility of controlling the moisture content of the surface of lumber by sensors of the equilibrium moisture content of wood is put forward. The results of the experiment are presented to identify the speed and accuracy of achieving the values of the equilibrium moisture content of wood by samples.

Keywords: wood processing, wood drying, wood drying parameters control systems.

ИВАНОВ Никита Геннадьевич – аспирант кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0003-0336-8986.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nikitais@bk.ru

IVANOV Nikita G. – PhD Student, Department of Materials Technology, Designs and Constructions of Wood, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0003-0336-8986.

194021, Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: nikitais@bk.ru

АРТЕМЕНКОВ Алексей Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0000-0003-4281-8356. SPIN-код: 1146-8700. Web of Science Researcher ID: AAA-2039-2022. Scopus Author ID: 57209456120.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a-artemenkov@mail.ru

ARTEMENKOV Aleksey M. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Materials Technology, Designs and Constructions of Wood, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0003-4281-8356. SPIN-code: 1146-8700. Web of Science Researcher ID: AAA-2039-2022. Scopus Author ID: 57209456120.

194021, Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: a-artemenkov@mail.ru