

УДК 674.047.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ СУШКИ ТОПЛИВНОЙ ДРЕВЕСИНЫ В ПАЧКАХ НА ЛЕСОСЕКЕ

П.Н. АНИСИМОВ, *асп., ПГТУ⁽¹⁾*,

Е.М. ОНУЧИН, *доц., ПГТУ, канд. техн. наук⁽¹⁾*

anisimovpn@volgatech.net, onuchinem@volgatech.net

⁽¹⁾ ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»
424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3, ПГТУ

Известно, что повышение влажности древесного топлива приводит к снижению его теплотворной способности и снижает эффективность энергетического оборудования. С целью повышения качества топливной древесины, то есть повышения теплотворной способности и снижения влажности, практикуется естественная атмосферная сушка. Цель данного исследования – по экспериментальным данным получить математическую модель естественной сушки целых деревьев, уложенных в пачки на лесосеке при заготовке топливной древесины. Для этого было проведено экспериментальное исследование естественной сушки с марта по октябрь 2015 г. целых деревьев сосны и березы разного диаметра, уложенных определенным образом в пачки на лесосеке. В результате была разработана математическая модель, описывающая изменение содержания влаги в деревьях сосны в процессе их естественной сушки в штабеле на лесосеке. Полученное уравнение регрессии определяет зависимость средней влажности древесины в пачке от диаметра древесины, количества жидких атмосферных осадков, относительной влажности и температуры окружающего воздуха, средней скорости движения воздуха, обдувающего пачку деревьев, продолжительности естественной сушки. Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать изменение влагосодержания древесины в процессе естественной сушки с погрешностью менее 5 %. Влажность древесины в процессе естественной сушки с марта по октябрь в среднем была снижена с 52 % до 27 %. Кроме того, в статье предложен способ заготовки топливной древесины энергетических лесных плантаций. Предложен способ укладки деревьев в пачки при заготовке топливной древесины, выращенной на лесных плантациях. Результаты исследования могут быть использованы для повышения эффективности производства древесного топлива. Предлагаемая математическая модель может быть использована на практике для прогнозирования изменения влагосодержания древесины целых деревьев, уложенных в пачки для естественной сушки под открытым небом, и соответственно для определения оптимальной продолжительности сушки.

Ключевые слова. Естественная атмосферная сушка, математическая модель сушки, влажность древесины, топливная древесина, энергетические лесные плантации.

Известно, что повышенная влажность топлива приводит к снижению его теплотворной способности и снижает эффективность энергетического оборудования [1–10, 19–22]. Это относится и к прямому сжиганию древесного топлива, и к технологии сжигания древесины с промежуточной газификацией [23], и к технологии производства из древесины жидкого топлива [24], поскольку генераторный газ и пиролизное топливо с высоким влагосодержанием имеют низкую теплотворную способность. Практика показывает, что при газификации древесины относительной влажностью более 45 % наблюдается нестабильное горение генераторного газа на выходе из газогенератора [7].

С целью повышения качества древесного топлива, то есть повышения теплотворной способности и снижения влажности, практикуется естественная атмосферная сушка. Лесосечные отходы, а также топливную древесину в виде целых деревьев укладывают

в пачки или штабеля для летней просушки и осыпания зелени [8, 10].

Особенности естественной сушки круглой древесины в условиях умеренного континентального климата

Многочисленные исследования свидетельствуют о повышении влажности (повторном увлажнении) древесины при ее хранении под открытым небом, без защиты от атмосферных осадков, осенью и весной, во время дождей и низкой температуры и во время таяния снега [20, 25, 26]. При хранении круглой древесины в штабеле, не защищенном покрытием от атмосферных осадков, о повторном увлажнении в летний период в разных исследованиях сообщаются различные сведения. В исследованиях [21, 22] сообщается, что в летний период повторное увлажнение вследствие действия атмосферных осадков не наблюдалось. В других наблюдалось незначительное повторное увлажнение в летний период, во время обильных

дождей, как в случае хранения в непокрытых, так и покрытых штабелях [19, 25]. Влажность непокрытого штабеля повышается интенсивнее, однако вследствие лучшей продуваемости он также быстрее высыхает после повторного увлажнения по сравнению с покрытым сверху и с боков штабелем [25].

Особенности логистики древесины энергетического назначения

Потребление древесного топлива для производства тепловой и электрической энергии имеет ярко выраженный сезонный характер с максимумом потребления в зимние месяцы. В то же время измельчение мороженой древесины требует повышенных затрат энергии, так как она обладает повышенной прочностью [11, 6]. В летний период количество лесосечных отходов, как правило, превышает потребности в топливе [6]. Учитывая все особенности топливного использования древесины, производство основного объема топливной щепы из различного сырья, будь то отходы лесозаготовки, неделовая древесина рубок ухода, отходы лесопиления или же древесина специальных энергетических плантаций, экономически целесообразно осуществлять в теплое время года до начала отопительного сезона и (или) до наступления отрицательных температур наружного воздуха. Кроме того, лесозаготовка на большей части территории России также носит явно выраженный сезонный характер на слабых и переувлажненных грунтах, отмечается, что основной объем древесины заготавливается в зимние месяцы [12].

Таким образом, наибольший практический интерес представляют закономерности естественной сушки в период весна–лето–ранняя осень древесины энергетического назначения, срубленной в конце зимы.

В исследованиях [20, 22, 26, 27] отмечается, что динамика изменения влажности круглой древесины при естественной атмосферной сушке в штабеле зависит от среднего диаметра древесного ствола, от температуры и относительной влажности окружающего воздуха, от породы дерева и наличия коры, от геометрических размеров штабеля и плотнос-

ти укладки древесины в штабеле, от скорости ветра, обдувающего штабель, а также от наличия защиты штабеля от атмосферных осадков и от количества атмосферных осадков.

Цель исследования

По экспериментальным данным получить математическую модель, описывающую изменение содержания влаги в деревьях сосны и березы в процессе их естественной сушки в пачке на лесосеке. Полученное уравнение регрессии должно определять зависимость средней влажности древесины в штабеле от диаметра древесины, влажности и температуры окружающего воздуха, продолжительности естественной сушки.

Средства и методы исследования. Математическое моделирование

Для того чтобы прогнозировать изменение среднего содержания влаги в древесине в процессе естественной атмосферной сушки в зависимости от температуры и относительной влажности окружающего воздуха, а также количества атмосферных осадков, предлагается уравнение (3), являющееся модификацией уравнений математических моделей процесса естественной сушки, предложенных в работах [21, 22]

$$w_{i+1} = w_i + k_1 \cdot \sum P + k_2 \cdot \sum E, \% \quad (1)$$

где w_{i+1} – прогнозируемая относительная влажность древесины в процессе естественной сушки к моменту времени τ_{i+1} , %;

i – единица времени, к примеру одна неделя, две недели или один месяц;

w_i – средняя относительная влажность древесины к моменту времени τ_i , %;

$\sum P$ – суммарное за период времени $(\tau_{i+1} - \tau_i)$ количество жидких атмосферных осадков, мм;

$\sum E$ – суммарное за период времени $(\tau_{i+1} - \tau_i)$ прямое испарение воды с поверхности, мм;

k_1, k_2 – коэффициенты, полученные экспериментальным путем.

Суммарное за период времени $(\tau_{i+1} - \tau_i)$ прямое испарение воды с поверхности $\sum E$, мм, находится по формуле (2), которая

основана на формуле для определения количества испаряющейся в час влаги с открытой водной поверхности, предложенной сушильной лабораторией Всесоюзного теплотехнического института (Москва) и приведенной в справочнике [13]

$$\sum E = h \cdot (7,4 \cdot (0,022 + 0,017 \cdot \vartheta) \times (p_n - p_{\text{бар}}) \cdot 101,3) / P_{\text{бар}}, \text{ мм}, \quad (2)$$

где h – количество часов в рассматриваемом периоде времени ($\tau_{i+1} - \tau_i$);

ϑ – средняя скорость движения воздуха, обдувающего пачку уложенных деревьев, измеренная на середине высоты пачки;

p_n – давление насыщенного водяного пара в воздухе при температуре, равной температуре воды (в нашем случае температура воды равна температуре окружающего воздуха), кПа;

$p_{\text{бар}}$ – парциальное давление водяного пара в воздухе, кПа;

$P_{\text{бар}}$ – барометрическое давление, кПа.

Тогда суммарное прямое испарение воды с поверхности $\sum E$ за период времени ($\tau_{i+1} - \tau_i$) будет равно произведению количества часов в рассматриваемом периоде времени ($\tau_{i+1} - \tau_i$) на количество испаряющейся в час влаги E .

Давление насыщенного водяного пара над поверхностью чистой воды (в диапазоне температур 0–83°C) можно найти по таблицам или по формуле, предложенной в работе [14]

$$p_n = 0,001 \cdot 10^{(658 + 10,2 \cdot t) / (236 + t)}, \text{ кПа}, \quad (3)$$

где t – температура окружающего воздуха за период времени ($\tau_{i+1} - \tau_i$), °C.

Парциальное давление водяного пара в воздухе находится по известной формуле

$$p_n = p_{\text{бар}} \cdot \varphi / 100, \text{ кПа}, \quad (4)$$

где φ – средняя относительная влажность окружающего воздуха за период времени ($\tau_{i+1} - \tau_i$), %.

Коэффициенты k_1, k_2 , которые были получены экспериментальным путем, учитывают прочие параметры, влияющие на процесс атмосферной сушки древесины, такие как средний диаметр древесного ствола в пачке деревьев, особенности породы древесины, тип энергетической древесины (целые деревья, лесосечные отходы, неокоренная, частично окоренная, и т. д.), а также условия складиро-

вания (размеры пачки или штабеля, плотность укладки пачки или штабеля, наличие покрытия от дождя штабеля сверху и т. д.).

Эксперимент

С целью нахождения коэффициентов k_1, k_2 уравнения (1), а также нахождения уравнения регрессии, определяющего зависимость коэффициентов k_1, k_2 от среднего диаметра стволов деревьев в пачке, был проведен эксперимент по атмосферной сушке целых деревьев сосны, определенным образом (рис. 1) уложенных в пачки на лесосеке. Исследование проводилось на территории Учебно-опытного лесхоза ФГБОУ ВПО «ПГТУ» в Медведевском районе республики Марий Эл (56,477°N; 47,861°E).

Из целых срубленных деревьев на лесосеке были сформированы 4 пачки – 3 пачки сосны, рассортированной по диаметру, и 1 пачка березы, не рассортированной по диаметру. Объем пачки и способ укладки деревьев определяется по предлагаемой авторами технологии заготовки древесины энергетического назначения, состоящей из двух этапов. На первом этапе деревья срезаются и укладываются в пачки с помощью валочно-пакетирующей машины с одной ее стоянки. На втором этапе после атмосферной сушки пакетов в теплый период целые деревья измельчаются в щепу на лесосеке с помощью

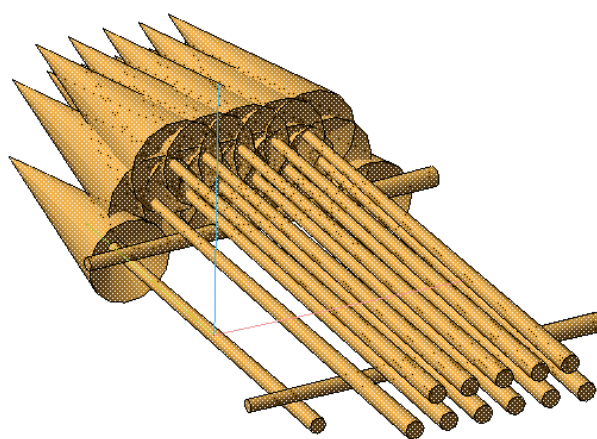


Рис. 1. Способ укладки на лесосеке пачек из целых деревьев для естественной подсушки при заготовке древесины энергетического назначения

Fig. 1. Way of laying of packs of the whole trees for fuelwood for natural drying on a cutting area

Параметры пачек целых деревьев сосны, уложенных на лесосеке для естественной сушки
Parameters of packs of the whole trees of a pine laid on a cutting area for natural drying

№ пачки деревьев	Средний возраст деревьев, лет	Средний диаметр ствола, м	Средняя высота дерева, м	Количество деревьев в пачке, шт.	Объем древесины в пачке, плотн. м ³	Средняя высота пачки, м
1	14	0,07	8	21	0,65	1
2	22	0,11	10,5	18	1,9	1,1
3	32	0,15	14,5	15	3,7	1,1
4 (береза)	25	0,14	13	25	5	1,3

мобильной рубительной машины с накопительным контейнером.

В одну пачку были уложены деревья приблизительно одного диаметра. Параметры пачек деревьев приведены в табл. 1. Деревья в пачках были уложены целиком. Отсутствовало какое-либо покрытие пачек от атмосферных осадков. Каждая пачка деревьев была уложена на подкладку на грунт непосредственно на лесосеке. Подкладка представляет собой деревья, уложенные поперечно, как показано на рис. 1.

Деревья сосны и березы были срублены валочно-пакетирующей машиной и уложены в пачки на лесосеке в начале марта на открытом месте после вырубki. Пачки были оставлены на лесосеке для естественной подсушки древесины и опадания хвои и частично коры до конца сентября. В ходе эксперимента 1-го или 2-го числа каждого месяца с апреля по октябрь проводились измерения влагосодержания древесины. Влагосодержание свежесрубленной древесины в начале марта и в конце эксперимента после окончания естественной сушки 1-го октября было определено контрольным методом определения влажности в соответствии с ГОСТ 16588-91 [15]. Из каждой пачки была сделана выборка в количестве от 6 до 8 образцов. Образцы были взвешены на весах с погрешностью менее 0,1 г до и после сушки в сушильном шкафу при температуре 103 °С. Влажность древесины в процессе естественной сушки в ходе эксперимента 1-го или 2-го числа каждого месяца с апреля по сентябрь измерялась с помощью электровлагомера [16] HYDROMETTE HT85T.

В ходе эксперимента регистрировались параметры окружающей среды в месте

нахождения пачек деревьев, влияющие на процесс сушки: количество осадков в виде дождя, относительная влажность воздуха и температура воздуха, скорость движения воздуха, обдувающего пачку. Количество осадков измерялось ежедневно с помощью дождемера полевого М-99. Средняя относительная влажность окружающего воздуха регистрировалась с помощью термогигрометра. Скорость движения воздуха, обдувающего пачку, измерялась с помощью анемометра на уровне середины высоты пачки.

Результаты исследования

Все зарегистрированные параметры окружающей среды были приведены к среднемесячным значениям, остальные косвенные параметры были вычислены по формулам (2–4), все они представлены в табл. 2. Суммарным за период времени $(\tau_{i+1} - \tau_i)$ количеством атмосферных осадков $\sum P$, мм, в эксперименте является суммарное количество дождя, выпавшего за i -й месяц сушки древесины. В эксперименте и моделировании в качестве $\sum E$ было принято суммарное прямое испарение воды с поверхности за i -й месяц. В эксперименте и моделировании в качестве t принималась среднемесячная температура окружающего воздуха, измеряемая вблизи пачки деревьев. Поскольку высота пачек примерно одинакова, то скорость движения воздуха была замерена в середине средней высоты пачки, на уровне 0,55 м от поверхности земли.

Поскольку все пачки деревьев находились на одной лесосеке, то все параметры окружающей среды (табл. 2), влияющие на процесс естественной сушки, приняты одинаковыми для всех 4-х экспериментальных пачек деревьев.

Параметры окружающей среды в процессе естественной сушки
Environment parameters in the course of natural drying

i	Месяц	t , средняя темпер. окуж. воздуха, °C	ϕ , средняя относит. влажность окуж. воздуха, %	ΣP , месячное количество осадков, мм	p_n , давление насыщения, кПа	p_n , парц. давление вод. пара в воздухе, кПа	ϑ , средняя скорость движения воздуха около пачки, м/с	ΣE , месячное испарение с открытой поверхн., мм
0	Март	-2,1	—	—	—	—	—	—
1	Апр.	3,95	74	66	0,81	0,6	1,2	47,9
2	Май	16	57	22,1	1,82	1,04	1	169,3
3	Июнь	18,75	66,5	54,2	2,17	1,44	0,8	139
4	Июль	17,1	90	138,7	1,95	1,76	1,3	48
5	Авг.	15,35	75,4	64,1	1,74	1,32	1	93,3
6	Сент.	14,5	65	30,8	1,65	1,07	0,9	115,9
	Сумма	—	—	375,8	—	—	—	613,5

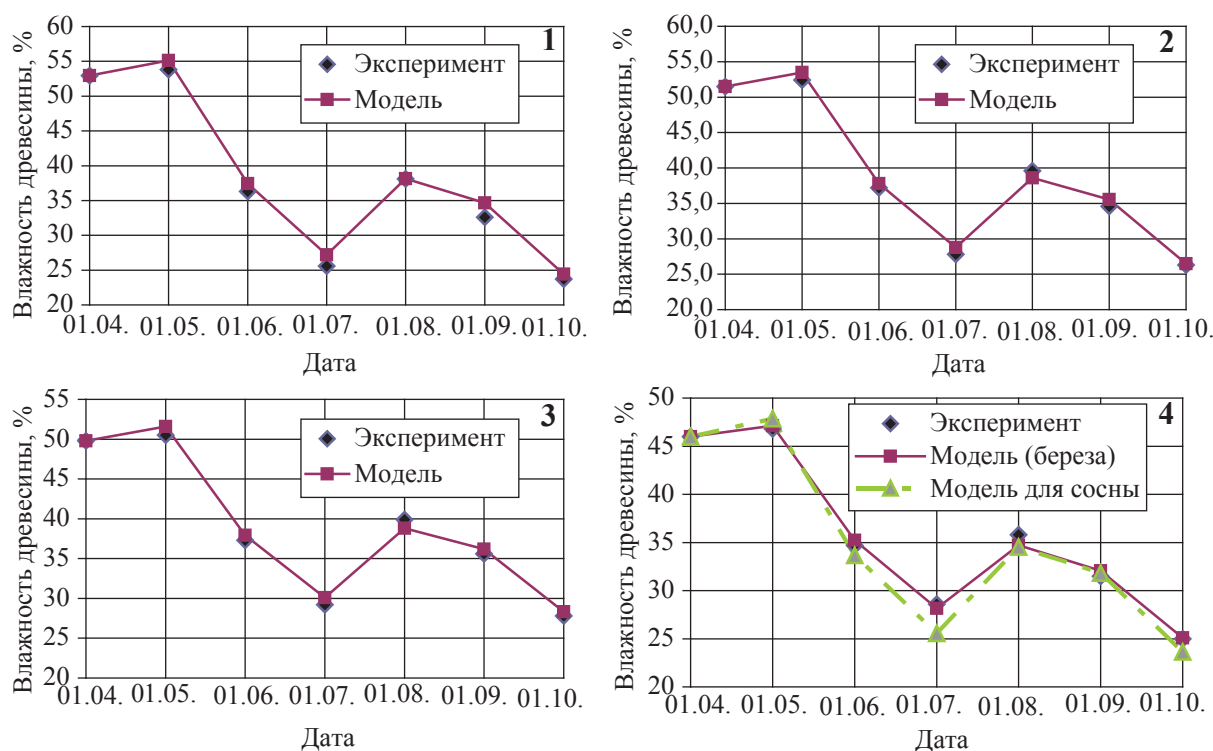


Рис. 2. Значения относительной влажности древесины, полученные в результате измерений и вычисленные по формуле (1)

Fig. 2. Experimental and theoretical (equation 1) values of moisture content of wood

Результаты измерения влажности древесины в процессе естественной сушки представлены на графиках 1–4 рис. 2. Отдельными точками на графиках обозначены экспериментальные значения влажности, линией обозначены значения влажности древесины, вычисленные по формуле (1).

Отклонение теоретических значений влажности древесины, вычисленных по фор-

муле (1), от экспериментальных значений составляет менее 5 %. На графике 4 (рис. 2) дополнительно пунктирной линией обозначены значения влажности березы, вычисленные по формуле 1 с коэффициентами k_1 , k_2 для сушки сосны (по формулам 5 и 6). Как видно из графика 4, при моделировании сушки березы подстановка экспериментальных коэффициентов k_1 , k_2 , полученных для сосны, приво-

Экспериментальные коэффициенты k_1, k_2 математической модели (1)

Experimental coefficients of k_1, k_2 of mathematical model (1)

№ пачки деревьев	k_1	k_2
1	0,1246	-0,1252
2	0,1110	-0,1102
3	0,1002	-0,0971
4 (береза)	0,075	-0,08

дит к увеличению погрешности до 10 %, что подтверждает влияние породы древесины на процесс сушки.

Коэффициенты регрессии k_1, k_2 в формуле (1) были определены методом наименьших квадратов, т. е. путем минимизации суммы квадратов отклонений измеренных значений влажности древесины w от вычисленных с помощью регрессионной модели (1). Значения экспериментальных коэффициентов k_1, k_2 модели (1) представлены в табл. 3.

Как видно из графиков рис. 2, на процесс естественной сушки большое влияние оказывает диаметр ствола дерева. Аппроксимацией значений коэффициентов k_1, k_2 для сушки сосны, полученных экспериментально, были получены уравнения (5, 6), определяющие зависимость коэффициентов k_1, k_2 от диаметра древесины

$$k_1 = -0,3231 \cdot D + 0,143, \quad (5)$$

$$(R^2 = 0,99);$$

$$k_2 = 0,3438 \cdot D - 0,1442, \quad (6)$$

$$(R^2 = 0,99),$$

где D – средний диаметр древесных стволов в пачке, м.

Обсуждение полученных результатов

Максимальное снижение влажности древесины за все время хранения наблюдалось в первой пачке с древесиной среднего диаметра 0,07 м, с марта по сентябрь относительная влажность снизилась с 53,5 % до 23,7 %. Чем больше был диаметр древесины, тем меньше снизилась влажность. В третьей пачке древесина с диаметром 0,15 м высохла до влажности 27,8 % с первоначальной 50,1 %. Во всех пачках наблюдалось повторное увлажнение сохнувшей древесины в июле, когда количество атмосферных осадков $\sum P$, мм, значительно

(в 3 раза) превышало суммарное теоретическое испарение с поверхности воды $\sum E$, мм. В июле в этом году выпало 190 % месячной нормы осадков. В другие месяцы наблюдалось снижение влажности древесины. Таким образом, для свободно уложенных пачек в условиях, когда $\sum P$ не превышает $\sum E$, покрытие пачки деревьев сверху от атмосферных осадков не является обязательным.

Поскольку пачки деревьев были уложены непосредственно на грунт, то два нижних дерева выполняли функцию подкладочных и их влажность не учитывалась при определении средней влажности пачки.

Предлагаемая математическая модель может быть использована на практике для прогнозирования изменения влагосодержания древесины целых деревьев, уложенных в пачки для естественной сушки под открытым небом и соответственно для определения оптимальной продолжительности сушки. Для прогнозирования с помощью предлагаемой математической модели влагосодержания круглой древесины и целых деревьев в процессе естественной сушки, удовлетворяющем вышеприведенные условия, можно использовать статистические данные о климате конкретного района, например из [17, 18].

Ограничения и условия корректного использования результатов исследования

Предлагаемая математическая модель для определения влажности древесины в процессе сушки целых деревьев, уложенных в пачку на открытом воздухе, справедлива только для теплого времени года с положительной среднесуточной температурой окружающего воздуха, когда суммарное испарение $\sum E$ за весь период сушки превышает суммарные

осадки в виде дождя ΣP . Регрессионные зависимости (5) и (6) для определения коэффициентов k_1 , k_2 применимы для целых или распиленных пополам деревьев сосны, уложенных под открытым небом приведенным на рис. 1 способом без защиты от атмосферных осадков. Модель применима для естественной сушки в условиях лесосеки деревьев сосны среднего диаметра от 0,05 до 0,18 м, при среднемесячной температуре окружающего воздуха от +3 до +35, при среднемесячной скорости движения, воздуха, обдувающего пачку деревьев, от 0,1 до 3,5 м/с.

Что касается определения продолжительности времени сушки, то для параметров окружающей среды, приведенных в табл. 2, построив график (рис. 2) изменения теоретической влажности древесины, вычисленной по формуле (1), можно сделать вывод, что оптимально закончить процесс сушки можно в конце июня или в конце сентября.

Выводы

По экспериментальным данным получена математическая модель, описывающая изменение содержания влаги в деревьях сосны в процессе их естественной сушки в штабеле на лесосеке. Полученное уравнение регрессии определяет зависимость средней влажности древесины в штабеле от диаметра древесины, количества жидких атмосферных осадков, относительной влажности и температуры окружающего воздуха, средней скорости движения воздуха, обдувающего пачку деревьев, продолжительности естественной сушки.

Отклонение теоретических значений влажности древесины, вычисленных по предлагаемым зависимостям, от экспериментальных данных составляет менее 5 %, что подтверждает адекватность предложенной регрессионной модели (1) и полученных экспериментальных коэффициентов k_1 , k_2 (табл. 3, формулы (5) и (6)).

Библиографический список

- Анисимов, П.Н. Оценка и способы повышения энергетической эффективности производства топливной щепы / П.Н. Анисимов, Е.М. Онучин // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во «Скан», 2015. – Т. 1 – С. 252–255.
- Анисимов, П.Н. Моделирование работы системы энергообеспечения мобильных технологических линий по производству сухой топливной щепы с использованием части производимого биогенного топлива / П.Н. Анисимов, Е.М. Онучин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 89. – С. 518–530.
- Анисимов, П.Н. Разработка схемно-конструктивных решений биотопливной когенерационной установки модульного исполнения с двигателем Стирлинга / П.Н. Анисимов, Е.М. Онучин // Труды поволжского государственного технологического университета. Серия: технологическая. – 2015. – № 3. – С. 116–121.
- Анисимов, П.Н. История развития и перспектива технологий и технических средств заготовки и переработки древесины энергетического назначения / П.Н. Анисимов, Е.М. Онучин // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2013. – № 13. – С. 136–142.
- Анисимов, П.Н. Анализ результатов вычислительного эксперимента на математической модели мобильной технологической линии для производства топливной щепы с двигателем внешнего сгорания / П.Н. Анисимов, Е.М. Онучин // Научному прогрессу – творчество молодых. Материалы X международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам: в 2 частях. – 2015. – С. 226–227.
- Головков, С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденов. – М.: Лесная пром-сть, 1987. – 224 с.
- Кузьмин, С.Н. Биоэнергетика: учебное пособие / С.Н. Кузьмин, В.И. Ляшков, Ю.С. Кузьмина. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 79 с.
- Использование древесной биомассы в энергетических целях: научный обзор / С.П. Кундас и др. – Минск: МГЭУ им А. Д. Сахарова, 2008. – 85 с.
- Михайлов, Г.М. Пути улучшения использования вторичного древесного сырья / Г.М. Михайлов, Н.А. Серов. – М.: Лесная пром-сть, 1988. – 223 с.
- Галактионов, О.Н. Исследование естественной сушки пакетов лесоматериалов / О.Н. Галактионов // Перспективы науки. – 2011. – № 12(27). – С. 170–172.
- Шелгунов, Ю.В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства: учеб для вузов / Ю.В. Шелгунов. – М.: Лесная пром-сть, 1982. – 520 с.
- Музалевский, В.И. Измерение влажности древесины / В.И. Музалевский. – М.: Лесная пром-сть, 1976. – 120 с.
- Суханов, В. Сезонный характер лесозаготовок / В. Суханов // Журнал ДЕРЕВО.RU : деревообработка и мебельное производство. – 2008. – № 6. – С. 42–45.
- Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч.3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 1 / В.Н. Богословский, А.И. Пирумов, В.Н. Посохин и др.; Под ред. Н.Н. Павлова и Ю.И. Шиллера. – М.: Стройиздат, 1992. – 319 с.
- Фильней, М.И. Новые формулы для определения термодинамических свойств водяного пара, содержащегося в атмосферном воздухе // Известия вузов (Строительство и архитектура). – 1966. – № 9. – С. 98.

16. ГОСТ 16588-91. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. – Введ. 01.01.1993. – М.: Технический комитет ТК 134, 1991. – 6 с. – (Государственный стандарт Российской Федерации).
17. Научно-прикладной справочник по климату СССР... Многолетние данные. – 1987–1993 гг.
18. ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации мировой центр данных. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Режим доступа: <http://meteo.ru/>.
19. Erber, G. Comparing Two Different Approaches in Modeling Small Diameter Energy Wood Drying in Logwood Piles / G. Erber, J. Routa, M. Kolström, C. Kanzian, L. Sikanen, K. Stampfer // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – March 2014 – Vol.35 No.1. pp. 15-22.
20. Routa, J. Validation of Prediction Models for Estimating the Moisture Content of Small Diameter Stem Wood / Johanna Routa, Marja Kolström, Johanna Ruotsalainen, Lauri Sikanen // *Croatian Journal of Forest Engineering*. – May 2014 – Vol.36 No.2. pp. 283-291.
21. Raitila, J. Comparison of Moisture Prediction Models for Stacked Fuelwood / Jyrki Raitila, Veli-Pekka Heiskanen, Johanna Routa, Marja Kolström, Lauri Sikanen // *BioEnergy Research*. – December 2015 – Vol.8, Issue 4, pp. 1896-1905.
22. Kim, D-W. Forecasting air-drying rates of small Douglas-fir and hybrid poplar stacked logs in Oregon, USA / Dong-Wook Kim, Glen Murphy // *International Journal of Forest Engineering*. – 2013 – Vol. 24, No. 2, pp 137-147.
23. Anil K Rajvanshi. Biomass gasification / Anil K Rajvanshi // *Alternative Energy in Agriculture*. – 1986 – Vol. II, pp. 83-102.
24. Fagernäs, L. Drying of biomass for second generation synfuel production / L. Fagernäs, J. Brammer, C. Wilen, M. Lauer, F. Verhoeff // *Biomass and Bioenergy*. – 2010 – No.34. pp. 1267-1277.
25. Gigler, J.K. Natural wind drying of willow stems / J.K. Gigler, W.K.P. van Loonb, J.V. van den Berga, C. Sonneveld, G. Meerdink // *Biomass and Bioenergy*. – 2000 – No.19. pp. 153-163.
26. Röser, D. Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energywood stems / Dominik Röser, Ari Erkkilä, Blas Mola-Yudego, Lauri Sikanen, Robert Prinz, Antti Heikkinen, Heikki Kaipainen, Heikki Oravainen, Kari Hillebrand, Beatrice Emer and Kari Väätäinen // *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*. – 2010 – 60 p.
27. Pettersson, M. Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees / M. Pettersson, T. Nordfjell // *Biomass and Bioenergy*. – 2007 – No.31. pp. 782-792.

FIELD RESEARCH OF NATURAL DRYING OF FUELWOOD IN BUNCH ON THE CUTTING AREA

Anisimov P.N., *pg. VSUT⁽¹⁾*; Onuchin E.M., *Assoc. Prof., VSUT, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾*

anisimovpn@volgatech.net, onuchinem@volgatech.net

⁽¹⁾Volga State University of Technology (VSUT), Lenin Sq., 3, 424000, Yoshkar-Ola, the Republic of Mari El, Russia

It is known that at increase of humidity of wood fuel decreases its calorific ability and efficiency of the power equipment decreases. Natural atmospheric drying is applied for the purpose of improvement of the quality of fuel wood. The goal of this research is to receive mathematical model of natural drying of the whole trees in bunch on a cutting area on the basis of experimental data. The field research of natural drying from March to October 2015 of the whole trees of a pine and birch of different diameter laid definitely in bunch on a cutting area was conducted for this purpose. The mathematical model describing change of moisture content in wood in the course of natural drying in bunch on a cutting area was as a result developed. The received equation of regression defines dependence of average humidity of wood in a bunch from diameter of wood, quantity of a liquid atmospheric precipitation, relative humidity and temperature of air, average speed of the movement of the air blowing in bunch of trees, durations of natural drying. The developed mathematical model allows to predict change of moisture content of wood in the course of natural drying with a margin error less than 5 %. Humidity of wood in the course of natural drying from March to October was on average reduced from 52 % to 27 %. Besides, in article the technology of logging of fuelwood on an energy forest is offered. The technology of stacking of trees in bunch at logging of the fuelwood which is grown up on forest plantations is offered. Results of research can be used for increase of production efficiency of wood fuel. The offered mathematical model can be used in practice for forecasting of change of wood moisture content of the whole trees in bunch. Mathematical model can be used also for determination of optimum duration of natural open-air drying.

Keywords: Natural drying, Drying model, Moisture content, Fuelwood, Energy forest.

References

1. Anisimov P.N., Onuchin E.M. *Otsenka i sposoby povysheniya energeticheskoy effektivnosti proizvodstva toplivnoy shchepy* [Analysis and ways of increase of power production efficiency of chip fuel] *Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost': materialy XXI vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Power engineering: efficiency, reliability, safety: Proceedings of the XXI-st All-Russian scientific and technical conference], Tomsk: Skan Publ., 2015, V. 1, pp. 252-255.
2. Anisimov P.N., Onuchin E.M. *Modelirovanie raboty sistemy energoobespecheniya mobil'nykh tekhnologicheskikh liniy po proizvodstvu sukhoy toplivnoy shchepy s ispol'zovaniem chasti proizvodimogo biogennogo topliva* [Modelling of the energy supply system of mobile technological lines for the production of dry fuel wood chips with the partial usage of the producible biogenic fuel]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University]. Krasnodar: KubSAU Publ., 2013, № 89, pp. 518-530.

3. Anisimov P.N., Onuchin E.M. *Razrabotka skhemno-konstruktivnykh resheniy biotoplivnoy kogeneratsionnoy ustanovki modul'nogo ispolneniya s dvigatelem Stirlinga* [Development of schematics and design solutions of elements of external combustion engine with a device for preparing, filing, and wood combustion] Trudy povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: tekhnologicheskaya [Collected papers of Volga State University of Technology. Series: Technology]. Yoshkar-Ola: Volga Tech Publ., 2015, № 3, pp. 116-121.
4. Anisimov P.N., Onuchin E.M. *Istoriya razvitiya i perspektiva tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv zagotovki i pererabotki drevesiny energeticheskogo naznacheniya* [History of development and prospect of technologies and techniques of logging and processing of fuelwood]. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa [Actual problems of timber industry], Bryansk: BHITA Publ., 2013, № 13, pp. 136-142.
5. Anisimov P.N., Onuchin E.M. *Analiz rezul'tatov vychislitel'nogo eksperimenta na matematicheskoy modeli mobil'noy tekhnologicheskoy linii dlya proizvodstva toplivnoy shchepy s dvigatelem vneshnego sgoraniya* [The analysis of results of computing experiment on mathematical model of the mobile technological line for production of chip fuel with use of the Stirling engine]. Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodykh Materialy X mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii po estestvennonauchnym i tekhnicheskim distsiplinam [Proceedings of the X International Youth Scientific Conference on natural-science and engineering disciplines]. Yoshkar-Ola: Publ. Volga Tech, 2015, pp. 226-227.
6. Golovkov S.I., Koperin I.F., Naydenov V.I. *Energeticheskoe ispol'zovanie drevesnykh otkhodov* [Wood waste utilization as an energy source]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry Publ.], 1987. 224 p.
7. Kuz'min S.N., Lyashkov V.I., Kuz'mina Yu.S. *Bioenergetika* [Bioenergy], Tambov: TGTU Publ., 2011, 79 p.
8. Kundas S.P. *Ispol'zovanie drevesnoy biomassy v energeticheskikh tselyakh* [Wood-biomass utilization as an energy source], Minsk: ISEI BSU Publ., 2008, 85 p.
9. Mikhaylov G.M., Cepov, N.A. *Puti uluchsheniya ispol'zovaniya vtorichnogo drevesnogo syr'ya* [Ways of improvement of use of secondary wood raw materials], Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1988, 223 p.
10. Galaktionov O.N. *Issledovanie estestvennoy sushki paketov lesookhodov* [Research into Natural Drying of Timber Waste] Perspektivy nauki [Science prospects], 2011, № 12(27), pp. 170-172.
11. Shelgunov Yu.V. *Mashiny i oborudovanie lesozagotovok, lesosplava i lesnogo khozyaystva* [Machines and equipment of logging, timber rafting and forestry]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1982, 520 p.
12. Muzalevskiy V.I. *Izmerenie vlazhnosti drevesiny* [Measurement of wood humidity]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1976. 120 p.
13. Suhanov V. *Sezonnyy kharakter lesozagotovok* [Seasonal nature of logging] DEREVO.RU, 2008, № 6, pp. 42-45.
14. Bogoslovskiy V.N., Pirumov A.I., Posokhin V.N. *Vnutrennie sanitarno-tekhnicheskie ustroystva. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukh* [Ventilation and air conditioning], Moscow: Stroyizdat, 1992, P. 3, Book. 1, 319 p.
15. Fil'ney M.I. *Novye formuly dlya opredeleniya termodinamicheskikh svoystv vodyanogo para, soderzhashchegosya v atmosfere* [New formulas for determination of thermodynamic properties of the water vapor containing in atmospheric air]. Izvestiya vuzov (Stroitel'stvo i arkhitektura) [News of higher education institutions (Construction and architecture)]. 1966, № 9, 98 p.
16. *GOST 16588-91. Piloproduktsiya i derevyannye detali. Metody opredeleniya vlazhnosti* [Industry standard № 16588-91], Moscow: Technical Activities Committee TK 134, 1991, 6 p.
17. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR...Mnogoletnie dannye* [Scientific and applied reference book on climate of the USSR... Long-term data], 1987-1993.
18. *FGBU «VNIIGMI-MTsD» Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut gidrometeorologicheskoy informatsii mirovoy tsent dannykh. Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy* [RIHMI-WDC]: <http://meteo.ru/>.
19. Erber G. Comparing Two Different Approaches in Modeling Small Diameter Energy Wood Drying in Logwood Piles. G. Erber, J. Routa, M. Kolström, C. Kanzian, L. Sikanen, K. Stampfer. Croatian Journal of Forest Engineering. March 2014. Vol.35 No. 1. pp. 15-22.
20. Routa J. Validation of Prediction Models for Estimating the Moisture Content of Small Diameter Stem Wood. Johanna Routa, Marja Kolström, Johanna Ruotsalainen, Lauri Sikanen. Croatian Journal of Forest Engineering. May 2014. Vol.36 No. 2. pp. 283-291.
21. Raitila J. Comparison of Moisture Prediction Models for Stacked Fuelwood. Jyrki Raitila, Veli-Pekka Heiskanen Johanna Routa, Marja Kolström, Lauri Sikanen. BioEnergy Research. December 2015. Vol. 8, Is. 4, pp. 1896-1905.
22. Kim D-W. Forecasting air-drying rates of small Douglas-fir and hybrid poplar stacked logs in Oregon, USA. Dong-Wook Kim, Glen Murphy. International Journal of Forest Engineering. 2013. V. 24, No. 2, pp 137-147.
23. Anil K Rajvanshi. Biomass gasification. Anil K Rajvanshi. Alternative Energy in Agriculture. 1986. Vol. II, pp. 83-102.
24. Fagnäs L. Drying of biomass for second generation synfuel production. L. Fagnäs, J. Brammer, C. Wilen, M. Lauer, F. Verhoeff. Biomass and Bioenergy. 2010. No. 34. pp. 1267-1277.
25. Gigler J.K. Natural wind drying of willow stems. J.K. Gigler, W.K.P. van Loonb, J.V. van den Berga, C. Sonneveld, G. Meerdink. Biomass and Bioenergy. 2000. No. 19. pp. 153-163.
26. Röser D. Natural drying methods to promote fuel quality enhancement of small energywood stems / Dominik Röser, Ari Erkkilä, Blas Mola-Yudego, Lauri Sikanen, Robert Prinz, Antti Heikkinen, Heikki Kaipainen, Heikki Oravainen, Kari Hillebrand, Beatrice Emer and Kari Väättäinen. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. 2010. 60 p.
27. Pettersson M. Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. M. Pettersson, T. Nordfjell. Biomass and Bioenergy. 2007. No. 31. pp. 782-792.