

УДК: 630*34

UDC: 630*34

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ЕСТЕСТВЕННОЙ СУШКИ ДЕРЕВЬЕВ
СОСНЫ И БЕРЕЗЫ В ПАЧКАХ НА
ЛЕСОСЕКЕ****MATHEMATICAL MODEL AND FIELD
RESEARCH OF FUEL WOOD NATURAL
DRYING IN BUNCHES IN THE CUTTING
AREA**

Анисимов Павел Николаевич
SPIN=9087-4940
аспирант
anisimovpn@list.ru

Anisimov Pavel Nikolaevich
SPIN=9087-4940
postgraduate student
anisimovpn@list.ru

Онучин Евгений Михайлович
SPIN=5242-8873
к.т.н., доцент
*Поволжский государственный технологический
университет, Йошкар-Ола, Россия*

Onuchin Evgeniy Mihajlovich
SPIN=5242-8873
Cand.Tech.Sci., associate professor
*Volga State University of Technology, Ioshkar-Ola,
Russia*

Цель данного исследования – в результате статистической обработки экспериментальных данных получить, математическую модель естественной сушки целых деревьев уложенных в пачки на лесосеке. Для этого с марта по октябрь 2015 года было проведено экспериментальное исследование естественной сушки целых деревьев сосны и берёзы разного диаметра, уложенных определенным образом в пачки на лесосеке. В результате была разработана математическая модель, описывающая изменение содержания влаги в деревьях, уложенных в пачки на лесосеке, в процессе их естественной сушки, с погрешностью менее 5%. Полученная математическая модель позволяет определять изменение средней влажности древесины в зависимости от следующих факторов: диаметра древесины, количества жидких атмосферных осадков, относительной влажности и температуры окружающего воздуха, средней скорости движения воздуха, обдувающего пачку деревьев, продолжительности естественной сушки. В ходе эксперимента влажность древесины в процессе естественной сушки с марта по октябрь в среднем снизилась 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

The purpose of this research is to receive mathematical model of natural drying of the whole trees in bunches in a cutting area based on experimental data. The field research of natural drying from March to October 2015 of the whole trees of pine and birch of different diameter laid definitely in bunches in 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 bunches in 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, duration of natural drying. The developed mathematical model allows predicting 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 fuel wood on an energy forest is offered. The technology of stacking of trees in bunches at logging of the fuel wood which is grown up in forest plantations is offered. The results of the research can be used for increase of production efficiency of fuel wood.

Ключевые слова: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ СУШКИ,
ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ, СУШКА ТОПЛИВОЙ
ДРЕВЕСИНЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЛЕСНЫЕ
ПЛАНТАЦИИ

Keywords: NATURAL DRYING, DRYING
MODELING, MOISTURE CONTENT, FUEL
WOOD DRYING, ENERGY FOREST

1. Введение. Известно, что повышенная влажность топлива приводит к снижению его теплотворной способности и снижает эффективность энергетического оборудования [1; 2; 5-7]. Это относится, и к прямому сжиганию древесного топлива, и к технологии сжигания древесины с промежуточной газификацией [5], и к технологии производства из древесины жидкого топлива [7]. С целью повышения качества древесного топлива, то есть повышения теплотворной способности и снижения влажности, практикуется естественная атмосферная сушка. Лесосечные отходы [11], а также топливную древесину в виде целых деревьев укладывают в пачки или штабели для летней просушки и осыпания зелени.

Важным вопросом является определение оптимальной продолжительности естественной сушки топливной древесины [10]. Для этого разрабатываются математические модели сушки, позволяющие предсказывать изменение влагосодержания древесины [6].

В исследованиях [10-14] 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 количества атмосферных осадков, от породы дерева и наличия коры, от геометрических размеров штабеля и плотности укладки древесины в штабеле, от скорости ветра обдуваемого штабеля, а также от наличия защиты штабеля от атмосферных осадков.

Многочисленные исследования свидетельствуют о повторном увлажнении древесины при её хранении под открытым небом, осенью и весной, во время продолжительных дождей и во время таяния снега [9; 13, 14]. В одних исследованиях [10; 12] сообщается, что в летний период повторное увлажнение вследствие действия атмосферных осадков не наблюдалось, в других наблюдалось незначительное повторное увлажнение в покрытых и непокрытых штабелях во время обильных

дождей и в летний период [6; 8; 9]. Однако, в итоге, во всех случаях наблюдалось снижение влажности по сравнению с первоначальной.

Математические модели естественной сушки круглой древесины основаны на эмпирических данных. В работе [12] отмечается, что актуальной задачей является пополнение базы данных моделей для конкретных условий сушки. В настоящее время достаточно хорошо исследована естественная сушка сортиментов различных пород древесины уложенных в штабель на нижнем складе. Однако не достаточно исследована естественная сушка долготья и целых деревьев уложенных в пачки непосредственно на лесосеке.

Поэтому, целью данного исследования является: по экспериментальным данным получить, математическую модель, определяющую зависимость изменения содержания влаги в целых деревьях сосны и березы в процессе их естественной сушки в пачке на лесосеке от параметров окружающей среды.

2. Методы исследования. 2.1 Математическое моделирование. Для того чтобы прогнозировать изменение средней влажности в древесине в процессе естественной атмосферной сушки предлагается уравнение (1), являющееся модификацией уравнений, предложенных в работах [10; 12].

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

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 (г. Москва) и приведенной в справочнике [3]:

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

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_n – парциальное давление водяного пара в воздухе, кПа;

$p_{бар}$ – барометрическое давление, кПа.

Давление насыщенного водяного пара над поверхностью чистой воды (в диапазоне температур 0-83°C) можно найти по таблицам или по формуле, предложенной в работе [4]:

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

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

Парциальное давление водяного пара в воздухе находится по известной формуле

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

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

Коэффициенты k_1 , k_2 были получены экспериментальным путем, они учитывают прочие параметры, влияющие на процесс естественной сушки древесины, такие как средний диаметр древесного ствола в пачке деревьев, порода древесины, тип топливной древесины (целые деревья, лесосечные отходы, неокоренная, частично окоренная, и т.д.). Также коэффициенты k_1 , k_2 учитывают условия складирования (размеры пачки или штабеля, плотность укладки пачки или штабеля, наличие покрытия от дождя штабеля сверху, и т.д.).

2.2 Эксперимент. С целью нахождения значений коэффициентов k_1 , k_2 уравнения (1), а также для нахождения уравнения регрессии, определяющего зависимость коэффициентов k_1 , k_2 от среднего диаметра стволов деревьев в пачке, был проведен эксперимент по естественной сушке целых деревьев сосны и березы, определенным образом (см. рисунок 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).

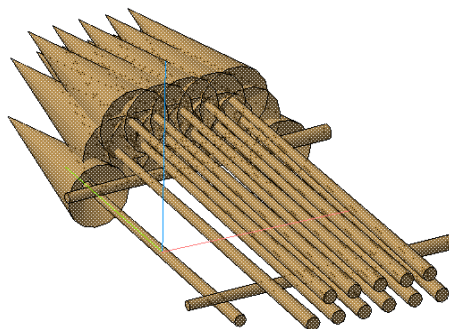


Рисунок 1 - Способ укладки на лесосеке пачек из целых деревьев для естественной подсушки при заготовке древесины энергетического назначения.

Из целых срубленных деревьев на лесосеке были сформированы 4 пачки – 3 пачки деревьев сосны, рассортированных по диаметру, и 1 пачка деревьев берёзы, не рассортированных по диаметру. Объем пачки и способ укладки деревьев определяется предлагаемой авторами технологией заготовки древесины энергетического назначения, состоящей из двух этапов. На первом этапе деревья срезаются и укладываются в пачки с

помощью валочно-пакетирующей машины. Количество деревьев в пачке определяется длиной вылета стрелы манипулятора. На втором этапе после летней атмосферной сушки пачек целые деревья измельчаются в щепу на лесосеке с помощью мобильной рубительной машины с контейнером.

В одну пачку были уложены целые деревья приблизительно одного диаметра. Параметры пачек деревьев приведены в таблице 1. Отсутствовало какое-либо покрытие пачек от атмосферных осадков.

Таблица 1 - Параметры пачек деревьев уложенных на лесосеке для естественной сушки

Параметр\ № пачки деревьев	1 (сосна)	2 (сосна)	3 (сосна)	4 (береза)
Средний диаметр ствола, м	0,07	0,11	0,15	0,14
Средняя высота дерева, м	8	10,5	14,5	13
Кол-во деревьев в пачке, шт.	21	18	15	25
Объем древесины в пачке, плотн. м3	0,65	1,9	3,7	5
Средняя высота пачки, м	1	1,1	1,1	1,3

Каждая пачка деревьев была уложена на подкладку на грунт, непосредственно на лесосеке. Подкладка представляет собой деревья, уложенные поперечно, как показано на рисунке 1.

Деревья сосны и березы были срублены валочно-пакетирующей машиной и уложены в пачки на лесосеке в начале марта 2015г на открытом месте после вырубки. 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 2015 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 (ISO 4470-81). 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.

В ходе эксперимента регистрировались параметры окружающей среды в месте нахождения пачек деревьев: 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.

3. Результаты исследования. Все зарегистрированные параметры окружающей среды были приведены к месячным значениям, остальные параметры были вычислены по формулам (2–4). Все параметры окружающей среды представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры окружающей среды в процессе естественной сушки

<i>i</i>	Месяц	<i>t</i> , средняя темпер. окоу. воздуха, °С	<i>φ</i> , средняя относит. влажность окоу. воздуха, %	$\sum P$, 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	$\sum E$, 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

Результаты измерения влажности древесины в процессе естественной сушки представлены на графиках 1-4 рисунка 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 формуле (1), от экспериментальных значений составляет менее 5%.

На графике 4 дополнительно пунктирной линией обозначены значения влажности берёзы, вычисленные по формуле (1) с коэффициентами k_1 , k_2 (по формулам 5 и 6) для сосны. Как видно из графика 4, при

математическом моделировании сушки берёзы подстановка экспериментальных коэффициентов k_1 , k_2 , полученных при сушке сосны приводит к увеличению погрешности до 10%, что подтверждает влияние породы древесины на процесс сушки.

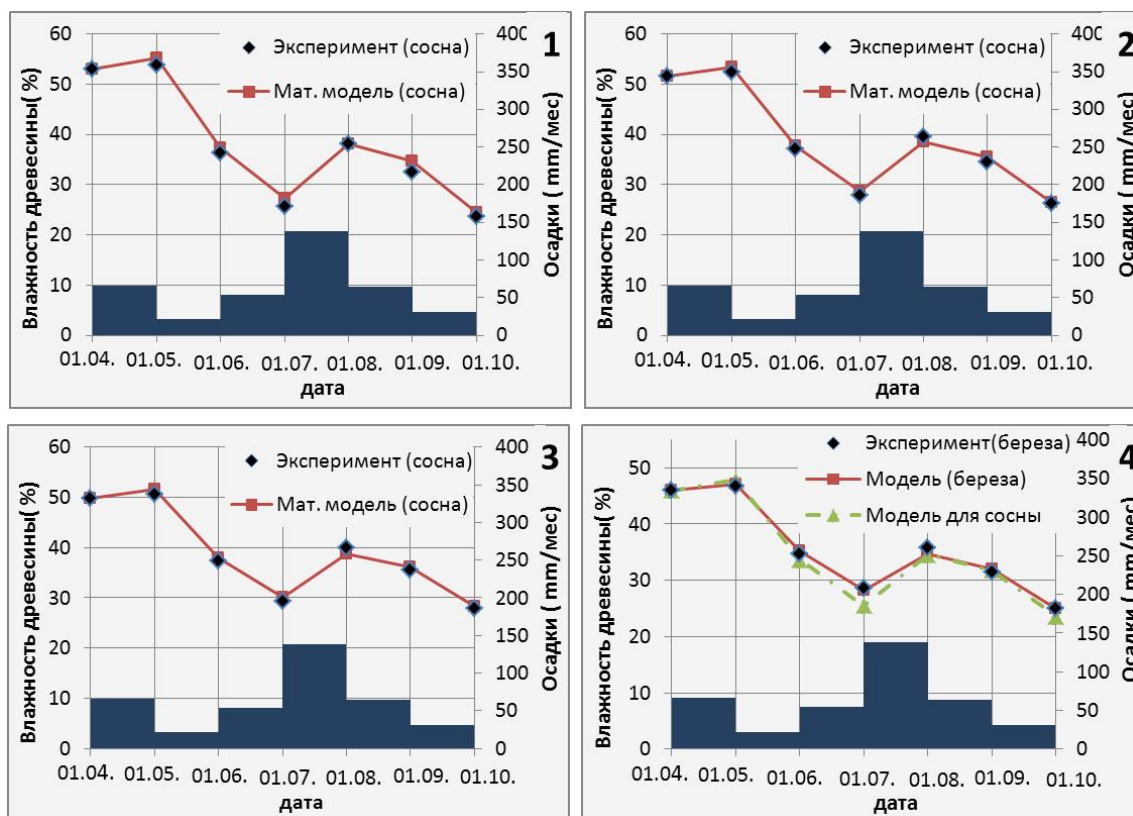


Рисунок 2 - Значения относительной влажности древесины, полученные в результате измерений и вычисленные по формуле (1).

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

Таблица 3 - Экспериментальные коэффициенты k_1 , k_2 математической модели (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

Как видно из графиков рис. 2 на процесс естественной сушки большое влияние оказывает средний 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.

4. Обсуждение полученных результатов. Максимальное снижение влажности древесины за всё время хранения наблюдалось в первой пачке с древесиной среднего диаметра 0,07м, с марта по сентябрь относительная влажность снизилась с 53,5% до 23,7%. Чем больше 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 2015 году выпало 190% месячной нормы осадков. В другие месяцы наблюдалось снижение влажности древесины.

Поскольку пачки деревьев были уложены непосредственно на грунт, то два нижних дерева выполняют 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. Для этого можно использовать статистические данные о климате конкретного района, например из Научно-прикладного справочника по климату СССР...Многолетние данные. – 1987-1993гг.

Прогнозируя влагосодержание древесины можно определить оптимальную продолжительность естественной сушки.

Рассмотрим 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 $\sum P$. Регрессионные зависимости (5 и 6) для определения коэффициентов k_1 , k_2 применимы для деревьев высотой 7-16 метров, уложенных под открытым небом в пачки, как на рисунке 1. Математическая модель применима для естественной сушки в условиях лесосеки деревьев со средним диаметром ствола от 0,05 до 0,18 метров, 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 климатических условий данного эксперимента, по графикам на рисунке 2 можно сделать вывод, что оптимальным будет закончить процесс сушки в конце июня или в конце сентября.

5. Заключение. Предложенная математическая модель определяет зависимость изменения средней влажности древесины в пачке в процессе летней сушки от диаметра древесины, среднемесячных значений атмосферных осадков в виде дождя, относительной влажности и температуры окружающего воздуха. Отклонение теоретических значений влажности древесины, вычисленных с помощью предлагаемой математической модели, от экспериментальных данных составляет менее 5%, что подтверждает адекватность предложенной регрессионной модели

(1) и полученных экспериментальным путем коэффициентов k_1 , k_2 (табл. 3, формулы 5 и 6).

Библиографический список

1. 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.

2. 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.

3. 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.; ил.

4. Фильней, М.И. Новые формулы для определения термодинамических свойств водяного пара, содержащегося в атмосферном воздухе // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1966. № 9. С. 98.

5. Brammer J.G. The Influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier-engine CHP system / J.G. Brammer, A.V. Bridgwater // Biomass and Bioenergy. – 2002 – Vol.22. pp. 271-281.

6. 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.

7. 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.

8. Filbakk, T., Høibø, O., Nurmi, J., 2011: Modelling natural drying efficiency in covered and uncovered piles of whole broadleaf trees for energy use. Biomass and Bioenergy 35: 454-463.

9. Gigler, J.K. Natural wind drying of willow stems / J.K. Gigler, W.K.P. van Loonb, J.V. van den Berga, C. Sonnevelda, G. Meerdink // Biomass and Bioenergy. – 2000 – No.19. pp. 153-163.

10. 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.

11. 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.

12. Raitila, J., Heiskanen V.-P., Routa, J., Kolström, M., Sikanen, L., 2015: Comparison of Moisture Prediction Models for Stacked Fuelwood. BioEnergy Research 8(4): 1896-1905.

13. 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.

14. 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 Väättäin // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. – 2010 – 60 p.

References

1. Anisimov, P.N. Modelirovanie raboty sistemy jenergoobespechenija mobil'nyh tehnologicheskikh linij po proizvodstvu suhoj toplivnoj shhepy s ispol'zovaniem chasti proizvodimogo biogennogo topliva / P. N. Anisimov, E. M. Onuchin // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. - 2013. - № 89. - S. 518-530.
2. Anisimov, P.N. Razrabotka shemno-konstruktivnyh reshenij biotoplivnoj kogeneracionnoj ustanovki modul'nogo ispolnenija s dvigatelem Stirlinga / P.N. Anisimov, E.M. Onuchin // Trudy povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Serija: tehnologicheskaja. – 2015. – №3. – С. 116-121.
3. Vnutrennie sanitarno-tehnicheskie ustrojstva. V 3 ch. Ch.Z. Ventiljacija i kondicionirovanie vozduha. Kn. 1 / V.N. Bogoslovskij, A.I. Pirumov, V.N. Posohin i dr.; Pod red. H.H. Pavlova i Ju.I. Shillera. – M.: Strojizdat, 1992. - 319 s.; il.
4. Fil'nej, M.I. Novye formuly dlja opredelenija termodinamicheskikh svojstv vodjanogo para, sodержashhegosja v atmosfernom vozduhe // Izvestija vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura. 1966. № 9. S. 98.
5. Brammer J.G. The Influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier-engine CHP system / J.G. Brammer, A.V. Bridgwater // Biomass and Bioenergy. – 2002 – Vol.22. pp. 271-281.
6. 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.
7. 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.
8. Filbakk, T., Høibø, O., Nurmi, J., 2011: Modelling natural drying efficiency in covered and uncovered piles of whole broadleaf trees for energy use. Biomass and Bioenergy 35: 454-463.
9. Gigler, J.K. Natural wind drying of willow stems / J.K. Giglera, W.K.P. van Loonb, J.V. van den Berga, C. Sonneveld, G. Meerdink // Biomass and Bioenergy. – 2000 – No.19. pp. 153-163.
10. 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.
11. 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.
12. Raitila, J., Heiskanen V.-P., Routa, J., Kolström, M., Sikanen, L., 2015: Comparison of Moisture Prediction Models for Stacked Fuelwood. BioEnergy Research 8(4): 1896-1905.
13. 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.
14. 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 Väättäin // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute. – 2010 – 60 p.