

УДК 674.047.3

DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

*А.Г. Гороховский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [O-6030-2018](#),
ORCID: [0000-0001-8847-8217](#)*

*В.В. Побединский, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [G-3245-2018](#),
ORCID: [0000-0001-6318-3447](#)*

*Е.Е. Шишкина, д-р техн. наук, доц.; ResearcherID: [O-6021-2018](#),
ORCID: [0000-0002-2584-4897](#)*

*Е.В. Побединский, аспирант; ResearcherID: [R-2080-2018](#),
ORCID: [0000-0003-1838-309X](#)*

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail pobed@el.ru

Рассмотрена проблема сушки пиломатериалов. Актуальность исследований обусловлена необходимостью совершенствования системы автоматизированного управления технологическим процессом сушки пиломатериалов на базе современных информационных технологий, снижения энергоемкости этих технологий, что закреплено в программных документах развития лесной отрасли на правительственном уровне. Функциональным назначением системы автоматизированного управления является обеспечение заданного уровня влажности древесины при ее необходимом качестве (исключение повреждений). Получить такую функциональную зависимость от температуры нагрева в камере и равновесной влажности воздуха традиционными статистическими методами чрезвычайно сложно из-за условий неопределенности параметров, поэтому следует использовать аппарат теории нечетких множеств. Цель исследований заключалась в получении функциональных зависимостей влажности пиломатериалов и времени сушки от температуры нагрева и равновесной влажности воздуха в сушильной камере на основе нечеткого вывода. Методологическую основу теоретических исследований составили: теория сушки, положения математического и нечеткого моделирования, а в части проверки адекватности предложенной нечеткой модели – методы математической статистики и теории эксперимента. Результатами исследований являются полученные зависимости влажности пиломатериалов и времени сушки от температуры нагрева и равновесной влажности воздуха в сушильной камере, синтез которых выполнен средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB. Предложенные функции влажности и времени сушки пиломатериалов учитывают основные параметры процесса (температуру нагрева и равновесную влажность воздуха) и экспериментально проверены на адекватность. Практическая применимость результатов заключается в возможности создания интеллектуальной системы автоматического управления процессом сушки пиломатериалов.

Для цитирования: Гороховский А.Г., Побединский В.В., Шишкина Е.Е., Побединский Е.В. Моделирование процесса сушки пиломатериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 154–166. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166

Ключевые слова: сушка древесины, влажность древесины, равновесная влажность воздуха, нечеткое моделирование, нечеткий вывод.

Введение

Задача повышения энергетической эффективности была и остается актуальной для лесной отрасли страны. На необходимость стимулирования ме-

роприятий по внедрению энергоэффективных технологий прямо указывается как на одну из глобальных задач в ряде правительственных документов, например в [8].

К наиболее энергоемким следует отнести процессы, связанные с длительным нагревом больших объемов сырья, – сушку пиломатериалов. При этом в современном деревообрабатывающем производстве она является важнейшей операцией, без правильного выполнения которой невозможно обеспечить необходимое качество изделий из древесины. Сложность заключается еще и в том, что ни одна из операций не вызывает таких значительных изменений свойств древесины, как ее сушка, что делает процесс управления сушильными камерами крайне нестабильным. Непосредственно сама древесина – исключительно сложный материал ортотропного, анизотропного строения, неоднородной структуры в зависимости от породы и направления по сечению. По этим причинам рабочие объемы пиломатериалов, загружаемые в сушильные камеры, не могут иметь одинаковых характеристик, т. е. предварительно установленные режимы, как правило, нуждаются в оперативной коррекции или адаптивном управлении на протяжении всего процесса сушки. Эти режимы обусловлены характеристиками пиломатериалов и оборудования: породой, геометрическими параметрами, районом произрастания, плотностью древесины, местом вырезки из ствола, содержанием влаги, температурой, аэродинамикой, тепловым оборудованием сушильной камеры и др. По причине многообразия условий и влияющих факторов в сушильном оборудовании наиболее сложной частью считается управление технологическим процессом. В настоящее время продолжают работы по совершенствованию системы автоматического регулирования сушильных камер [41, 46, 56]. Процессам моделирования посвящены работы [5, 6, 12, 16, 17], но в полной мере проблема остается нерешенной. Также получены недостаточно удовлетворительные результаты авторами исследований [2, 3, 7, 13, 15]. Основной причиной такого положения является нестабильность исходных данных [2, 14], с математической точки зрения теории нечетких множеств (ТНМ) это можно отнести к свойству неопределенности данных.

Обзор исследований по теме сушки древесины следует дополнить публикациями зарубежных авторов, в которых освещаются различные аспекты этого процесса. Например, сушка с учетом деформаций [55], моделирование тепло- и массопереноса [45], оценка качества суши по различным стандартам [39], при различных экспериментальных исследованиях [23], осциллирующая вакуумно-кондуктивная сушка [42], сушка с использованием моделей диффузии влаги [22, 33], с оценкой механических свойств древесины [35, 36]. Известны работы по вакуумной [24] и СВЧ-сушке [27, 37] древесины.

Необходимо отметить новую тенденцию в научных исследованиях – применение ТНМ для изучения и разработки автоматического управления сушильным оборудованием [41], нечеткого контроллера [46].

В отечественных [1, 4, 9, 40] и зарубежных изданиях [20, 25–31, 34, 39, 40, 43, 44, 49–54] широко представлена тема применения ТНМ в задачах моделирования различных процессов. В области нечеткого моделирования как в России, так и за рубежом наблюдается большая публикационная активность. Известны работы, раскрывающие развитие математического аппарата учета различных аспектов неопределенности [20, 28, 43, 54], а также многие прикладные исследования по разным техническим [19, 21, 28] и гуманитарным

[18, 32, 50] направлениям, в юриспруденции [38], экономике [51], медицинских науках [26, 31, 34].

На основании обзора научной информации можно сделать следующие выводы.

1. Результаты известных исследований не позволяют в полной мере решить проблему автоматического управления процессом сушки древесины, в первую очередь из-за неопределенностей в данных технологического процесса.

2. Вопросы исследования процессов сушки пиломатериалов на основе нечеткого моделирования ранее не рассматривались.

3. Для практической реализации нечетких моделей в основном используется система компьютерной математики MATLAB [30, 45], которая располагает средствами для этой цели – приложением Fuzzy Logic Toolbox.

Кроме того, при дальнейшем совершенствовании технологии сушки древесины нужно учесть еще одну задачу – сложность моделирования многопараметрического процесса. Следует отметить, что почти все параметры процесса управления сушкой пиломатериалов характеризуются свойствами неопределенности. Современные достижения математики, информационных технологий, теории автоматического управления содержат аппарат для создания совершенной системы интеллектуального автоматического регулирования процесса сушки, но разработки в этом направлении остаются вне поля зрения ученых. Соответственно – в исследованиях по данной теме необходимо учитывать следующие особенности.

Известно, что целью любого процесса сушки является обеспечение заданного уровня влажности древесины с наименьшими энергозатратами и необходимым качеством (исключение ее повреждений). К наиболее значимым управляющим параметрам процесса относятся температура и равновесная влажность воздуха в сушильной камере. Последняя может изменяться за счет организации воздухообмена. С точки зрения автоматического регулирования нужно получить функцию влажности древесины от температуры прогрева и равновесной влажности воздуха в камере. Влажность древесины зависит от многих факторов, которые в ранее проводимых исследованиях характеризовались статистическими параметрами. Однако реальные параметры в большей степени характеризуются свойствами неопределенности. В таких условиях получить функцию влажности древесины в зависимости от множества параметров статистическими методами, требующими огромного объема статистических и экспериментальных данных, не представляется возможным. Для подобных условий используется аппарат ТНМ и его приложение – нечеткое моделирование, которое показало свою эффективность в решении широкого класса задач во многих отраслях науки и производства. По рассматриваемой теме ранее были получены обширные экспериментальные результаты [2, 4, 15], на них и базируется настоящее исследование, но для вывода модели влажности известных статистических данных будет недостаточно. Обзор некоторых зарубежных исследований [18–21, 26–28, 30, 42, 47, 48, 52, 53, 55, 56] показал аналогичную картину, результаты для практического применения в системах интеллектуального управления отсутствуют.

На основании обзора публикаций и специфических особенностей процесса определились задачи настоящих исследований, итогом которых была разработка одной из моделей интеллектуальной системы управления процессом сушки пиломатериалов:

выполнение содержательной постановки задачи сушки пиломатериалов на основе нечеткого моделирования;
 определение нечетких функций принадлежности для входных и выходных переменных задачи (приведение к нечеткости);
 разработка базы правил нечеткой продукции;
 синтез нечеткой модели зависимостей влажности и времени сушки от входных параметров средствами Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB.

Объекты и методы исследования

Методологическую основу теоретических исследований составили положения теории сушки древесины, математического и нечеткого моделирования, а в части выполнения экспериментальных исследований по проверке адекватности предложенной нечеткой модели – методы математической статистики и теории эксперимента.

Разработка нечеткого вывода функций выполнялась по известной методике [1, 4, 40] в последовательности, приведенной ниже. Эта методика также использовалась авторами для решения других задач [9–11].

Выполнение содержательной постановки задач моделирования влажности и времени сушки пиломатериалов. В соответствии с известными методиками [1, 4, 40] формализация задачи начинается с описания данных об основных параметрах объекта в форме эвристических правил, моделирующих процесс сушки древесины. В данном случае рассматривается изменение влажности и времени сушки в зависимости от различных сочетаний основных влияющих параметров. В содержательном описании задачи определены наиболее специфические особенности процесса. Одновременно с этой процедурой выполняется формирование базы правил системы нечеткого вывода. Процесс зависит от многих факторов, но рассмотрим главные параметры, которыми управляется технологический процесс конвективной сушки, – текущая влажность и время сушки пиломатериалов. Предположим, что характеристики породы, геометрические размеры сырья, сушильной камеры и другие влияющие параметры закреплены на одном уровне. Известные [2] ориентировочные режимы процесса сушки условного пиломатериала с учетом равновесной влажности приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы сушки условного пиломатериала

Номер ступени	Температура t , °C	Равновесная влажность u , %	Влажность древесины W , %	Время сушки T , ч
1	69	14,5	60...40	39
2	71	12,5	40...35	52 (+13)
3	73	11,0	35...30	67 (+15)
4	75	9,5	30...25	84 (+17)
5	77	7,5	25...20	105 (+21)
6	79	6,5	20...15	132 (+27)
7	81	5,5	15...10	170 (+38)
8	83	4,0	10...8	192 (+22)

Процесс сушки является сильно нелинейным, поэтому для анализа он разделен на 8 ступеней. Влажность древесины обратно пропорциональна тем-

пературе и равновесной влажности воздуха. Время сушки в диапазоне влажности 60...40 % самое продолжительное и для условного пиломатериала составляет 39 ч. Далее влажность снижается, но в сравнении со следующими степенями это объясняется изменением влажности только на 5 %. Относительно влажности самое продолжительное время сушки на ступени 8, где время сушки для обеспечения снижения влажности на 2 % составляет 22 ч.

Для дальнейшей постановки задачи необходимо определить нечеткие функции принадлежности и базу правил нечеткой продукции.

Определение нечетких функций принадлежности для входных и выходных переменных задачи (приведение к нечеткости). Определим значения входных величин. Температура t в камере конвекционного типа для условного пиломатериала задается на протяжении всех ступеней (1–8) в диапазоне 69...83 °С. Равновесная влажность u согласно экспериментальным исследованиям [2] принимает значения от 4,0 до 12,5 %. Выходными величинами являются влажность W и время сушки пиломатериалов T .

Сушка в настоящей задаче начинается от влажности 60 % и заканчивается при 8 %. Время сушки необходимо рассматривать только как ориентировочное и только для условного пиломатериала. С учетом физических значений величин следует определить лингвистические переменные задачи.

На универсуме нечетких множеств в данном случае будет целесообразно принять 5 значений входных и выходных лингвистических переменных. Термножества значений лингвистических переменных представлены треугольными нечеткими числами, а на границах области определения – сигмоидальными нечеткими интервалами. Для термножества «Большая» переменной «Равновесная влажность» принято трапецеидальное нечеткое число, по причине увеличенного диапазона значений в этой области. В графическом виде лингвистические переменные приведены на рис. 1.

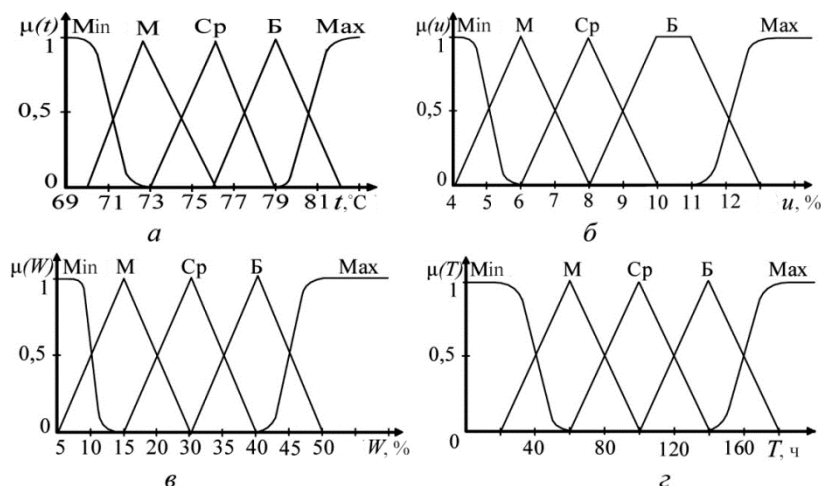


Рис. 1. Нечеткие функции принадлежности лингвистических переменных для вывода функций $W = f(t, u)$ и $T = f(t, u)$: а – «Температура t »; б – «Равновесная влажность u »; в – «Влажность W »; г – «Время T »

Fig. 1. Fuzzy membership functions of linguistic variables for the derivation of the function $W = f(t, u)$ and $T = f(t, u)$: а – “Temperature t ”; б – “Equilibrium humidity u ”; в – “Humidity W ”; г – “Time T ”

В качестве обозначений лингвистических переменных для предложенных функций приняты: «Минимальная» – Min; «Малая» – M; «Средняя» – Cp; «Большая» – B; «Максимальная» – Max.

В терминах ТНМ лингвистические переменные определены термножествами со следующими значениями: «Температура t » {Min, M, Cp, B, Max}; «Равновесная влажность u » {Min, M, Cp, B, Max}; «Влажность W » {Min, M, Cp, B, Max}; «Время T » {Min, M, Cp, B, Max}.

Формирование базы правил системы нечеткого вывода. Для нечеткого вывода функции принадлежности используем один из наиболее распространенных методов – метод Мамдани [4, 40]. Применение данного метода предполагает разработку базы правил нечеткой продукции. При этом влияние сочетаний входных воздействий на выходной параметр записывается в следующей форме:

если $t =$ «Минимальная» и $u =$ «Минимальная», то $W =$ «Минимальная» и $T =$ «Среднее».

Далее рассматривается описание вариантов сочетаний входных параметров (t и u) с использованием большого количества значений лингвистических переменных: «Средняя», «Большая», «Малая». С учетом специфических особенностей явления формализуется база правил нечеткого вывода функции, которая в полном объеме приведена в табл. 2.

Таблица 2

Состав базы правил нечеткой продукции для моделирования влажности пиломатериалов $W = f(t, u)$

Лингвистическая переменная «Температура t »	Выходные нечеткие подмножества «Влажность W » при изменении нечеткой функции «Равновесная влажность u »				
	Min	M	Cp	B	Max
Min	Max	Max	Max	Max	Max
M	B	B	Max	Max	Max
Cp	Cp	B	B	Max	Max
B	M	Cp	B	B	Max
Max	Min	M	Cp	B	Max

Аналогично получаем базу правил для вывода функции времени сушки (табл. 3).

Таблица 3

Состав базы правил нечеткой продукции для моделирования времени сушки пиломатериалов $T = f(t, u)$

Лингвистическая переменная «Температура t »	Выходные нечеткие подмножества «Время T » при изменении нечеткой функции «Равновесная влажность u »				
	Min	M	Cp	B	Max
Min	Cp	B	B	Max	Max
M	Cp	Cp	Cp	Max	Max
Cp	M	Cp	Cp	B	Max
B	Min	M	M	Cp	B
Max	Min	Min	M	Cp	B

Нечеткий вывод результирующей функции выполнен по методу Мамдани [4, 40]. Схема вывода в формате MATLAB приведена на рис. 2.

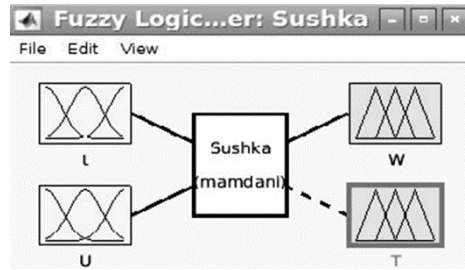


Рис. 2. Схема нечеткого вывода в среде MATLAB [30]

Fig. 2. Scheme of fuzzy inference in the MATLAB environment [30]

Результаты исследования и их обсуждение

Синтез нечетких моделей режимов сушки пиломатериалов. Формальная постановка задачи нечеткого вывода реализована в компьютерной программе Fuzzy Logic Toolbox приложения Matlab [30]. Процедура вывода показана на рис. 3.

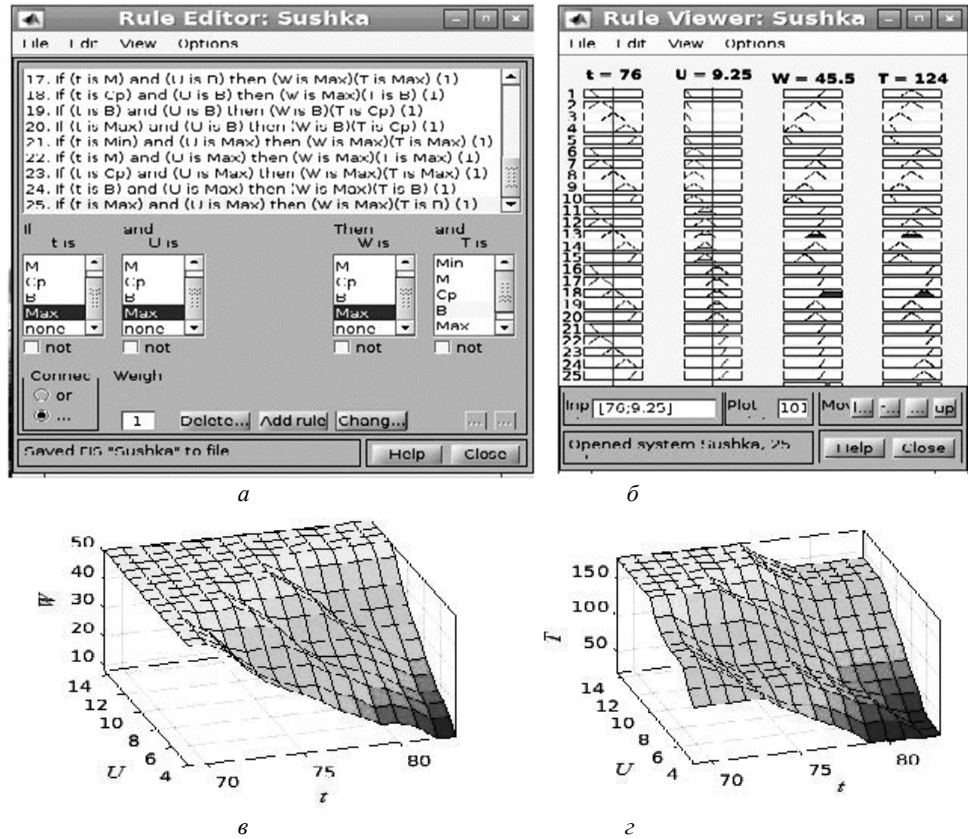


Рис. 3. Нечеткий вывод функций $W = f(t, u)$ и $T = f(t, u)$ в среде Fuzzy Logic Toolbox приложения MATLAB: *a* – база правил нечеткого вывода; *b* – процедура нечеткого вывода и приведения к четкости; *c* – функция нечеткого вывода «Влажность W »; *d* – функция нечеткого вывода «Время T »

Fig. 3. Fuzzy inference of the function $W = f(t, u)$ and $T = f(t, u)$ in the Fuzzy Logic Toolbox environment of the MATLAB application: *a* – base of rules of fuzzy inference; *b* – procedure of fuzzy inference and reduction to clarity; *c* – fuzzy inference function of the “Humidity W ”; *d* – fuzzy inference function of the “Time T ”

В данном случае использовался алгоритм по известной методике [4, 40]:

1. фаззификация (введение нечеткости);
2. формирование базы правил нечеткой продукции (рис. 3, а);
3. получение нечеткого вывода (рис. 3, б);
4. дефаззификация (приведение к четкости) (рис. 3, в);
5. получение конечной функции нечеткого вывода (рис. 3, г).

Найденные в результате нечеткого вывода функции являются достаточно корректными математически и могут использоваться для прогнозирования влажности и времени сушки пиломатериалов. Сравнение с экспериментальными данными [2] показывает достаточную их адекватность.

Результаты исследования сравниваются с существующими с анализом их соответствия следующим критериям научной ценности: отличие от известных результатов; научная новизна; практическая применимость.

Главное отличие состоит в том, что, как было показано, достаточно полноценных исследований, посвященных нечеткому моделированию процессов сушки древесины в целях разработки систем автоматического управления этим процессом на нечеткой логике, ни в России, ни за рубежом не проводилось.

Условия неопределенности в исходных параметрах процесса сушки приводят к ситуациям, когда традиционные методы неэффективны из-за отсутствия достоверных знаний об объекте управления. Предложенный подход и полученные результаты в отличие от существующих методов позволяют решить эту проблему применительно к процессу сушки пиломатериалов.

Научная новизна следует из отличительных особенностей наших результатов, т. е. впервые предложен теоретический подход к оценке влажности и времени сушки пиломатериалов на основе нечеткого моделирования. Другим элементом научной новизны являются установленные зависимости влажности и времени сушки пиломатериалов от температуры и равновесной влажности воздуха в сушильной камере. Адекватность полученных зависимостей находит подтверждение в результатах экспериментальных исследований [2].

Практическая применимость результатов заключается в возможности создания системы автоматического управления процессом сушки пиломатериалов. Результаты в виде функциональной зависимости, полученной на основе нечеткого вывода, необходимы для разработки нечеткого контроллера управления сушильной камерой.

Выводы

1. В настоящее время совершенствование методов исследований параметров сушки древесины невозможно без применения интеллектуальных программных систем и компьютерных средств. Предложенная постановка задачи нечеткого моделирования и реализация соответствующего программного обеспечения в среде MATLAB позволяют эффективно использовать информационные технологии в исследованиях, моделировании и совершенствовании сушильных камер.

2. Разработка модели оценки влажности пиломатериалов с привлечением статистических методов является чрезвычайно трудоемкой и недостаточно корректной. Для условий такого класса задач в наибольшей мере подходит аппарат нечетких множеств.

3. Предлагаемые функции влажности и времени сушки пиломатериалов, построенные на основе нечеткого вывода, учитывают основные параметры процесса (температуру в камере, равновесную влажность воздуха), а сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными [6, 14] показывает достаточную адекватность разработанной модели и позволяет реализовать принципиально новый подход к решению проблемы совершенствования сушильного оборудования, повышения качества пиломатериалов и снижения энергоемкости процессов в этой отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009. 393 с. [Vasil'yev V.I., Il'yasov B.G. *Intelligent Control Systems. Theory and Practice*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2009. 393 p.]
2. Гороховский А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2008. 290 с. [Gorokhovskiy A.G. *Sawn Timber Drying Technology Based on Modeling and Optimization of Heat and Mass Transfer Processes in Wood*: Dr. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2008. 290 p.]
3. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Чернышев О.Н. Оптимальное управление процессами тепломассообмена при конвективной сушке древесины // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. [Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Chernyshev O.N. Optimum Control of Processes of Thermo-Mass Transfer at Convection to Wood Drying. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 6].
4. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с. [Leonenkov A.V. *Fuzzy Modeling in the Environment of MATLAB and FuzzyTECH*. Saint Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2005. 736 p.]
5. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 470 с. [Lykov A.V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 470 p.]
6. Лыков А.В. О системах дифференциальных уравнений тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах // Инж.-физ. журн. 1974. Т. XXVI. № 1. С. 18–25. [Lykov A.V. On Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1974, vol. XXVI, no. 1, pp. 18–25].
7. Никитенко Н.И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток. Киев: Наук. думка, 1971. 266 с. [Nikitenko N.I. *Investigation of Non-Stationary Processes of Heat and Mass Exchange by the Grid Method*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971. 266 p.]
8. Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ № 1724-р от 26 сент. 2013 г. [Decree of the Government of the Russian Federation of September 26, 2013 No. 1724-r "Fundamentals of State Policy in the Field of Use, Protection and Reproduction of Forests in the Russian Federation for the Period up to 2030].
9. Побединский В.В., Газизов А.М., Санников С.П., Побединский А.А. Диэлектрическая проницаемость лесного фонда в зависимости от параметров среды при радиочастотном мониторинге // Вестн. Мордов. ун-та. 2018. Т. 28, № 2. С. 148–163. [Pobedinsky V.V., Gazizov A.M., Sannikov S.P., Pobedinskiy A.A. Dielectric Permeability of Forestry Depending on Environmental Parameters in Radio-Frequency Monitoring. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 148–163]. DOI: [10.15507/0236-2910.028.201802.148-163](https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201802.148-163)
10. Санников С.П., Побединский В.В., Бородулин И.В., Черницын М.А., Кузьминов Н.С. Зависимость падения мощности сигнала при радиочастотном мониторинге лесного фонда от конструктивных параметров // Измерение. Мониторинг.

Управление. Контроль. 2016. № 3(17). С. 23–29. [Sannikov S.P., Pobedinskiy V.V., Borodulin I.V., Chernitsyn M.A., Kuz'minov N.S. The Dependence of the Fall of the Signal Power on the Parameters of the Forest Environment when the Radio Frequency of Forest Monitoring. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control], 2016, no. 3(17), pp. 23–29].

11. Санников С.П., Побединский В.В., Газизов А.М., Бородулин И.В., Черницын М.А., Кузьминов Н.С. Зависимость падения мощности сигнала от параметров лесной среды при радиочастотном мониторинге лесного фонда // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 4(32). С. 181–187. [Sannikov S.P., Pobedinsky V.V., Gazizov A.M., Borodulin I.V., Chernitsyn M.A., Kuzminov N.S. Dependence of the Signal Power Loss on the Forest Ambience Parameters Under Radio-Frequency Monitoring of Forest Fund. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [System. Methods. Technologies], 2016, no. 4(32), pp. 181–187].

12. Смирнов М.С. О системе дифференциальных уравнений процесса сушки // Инж.-физ. журн. 1961. Т. IV, № 9. С. 40–44. [Smirnov M.S. On the System of Differential Equations of the Drying Process. *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics], 1961, vol. IV, no. 9, pp. 40–44].

13. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. М.: Энергоатомиздат, 1984. 416 с. [Tsoy P.V. *Methods for Heat and Mass Transfer Problem Solving*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 416 p.].

14. Шишкина Е.Е. Энергосберегающая технология конвективной сушки пиломатериалов на основе управляемого влагопереноса в древесине: дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2016. 336 с. [Shishkina E.E. *Energy-Saving Technology for Convective Drying of Sawn Timber Based on Controlled Moisture Transfer in Wood*: Dr. Eng. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2016. 336 p.].

15. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины (вопросы теории, методы расчета процессов, совершенствование технологии): дис. ... д-ра техн. наук. М., 1985. 381 с. [Shubin G.S. *Drying and Heat Treatment of Wood (Issues of Theory, Methods for Process Calculation, Technology Improvement)*: Dr. Eng. Sci. Diss. Moscow, M, 1985. 381 p.].

16. Шубин Г.С. Обобщенная система уравнений тепломассопереноса при переменных условиях среды и ее реализация на ЭВМ для расчета процессов сушки древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 1988. № 3. С. 49–56. [Shubin G.S. Generalized System of Heat and Mass Transfer Equations under Variable Environmental Conditions and Its Implementation on a Computer for Calculating the Drying Processes of Wood. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 1988, no. 3, pp. 49–56.]. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/apxiv/1988/%E2%84%96%203.pdf>

17. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 336 с. [Shubin G.S. *Drying and Heat Treatment of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 336 p.].

18. Alguliyev R., Abdullayeva F. Development of Fuzzy Risk Calculation Method for a Dynamic Federation of Clouds. *Intelligent Information Management*, 2015, vol. 7, no. 4, pp. 230–241. DOI: [10.4236/iim.2015.74018](https://doi.org/10.4236/iim.2015.74018)

19. Ali A., El-Serafi K., Mostafa S.A.K., El-Sheimy N. Frequency Features Based Fuzzy System for Rotating Machinery Vibration Analysis Using Smartphones Low-Cost MEMS Sensors. *Journal of Sensor Technology*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 56–74. DOI: [10.4236/jst.2016.63005](https://doi.org/10.4236/jst.2016.63005)

20. Azzouz S., Dhib K.B., Bahar R., Ouertani S., Elaieb M.T., Elcafsi A. Mass Diffusivity of Different Species of Wood in Convective Drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, iss. 2, pp. 573–582. DOI: [10.1007/s00107-017-1212-9](https://doi.org/10.1007/s00107-017-1212-9)

21. Carneiro A.L.G., Porto Jr. A.C.S. An Integrated Approach for Process Control Valves Diagnosis Using Fuzzy Logic. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 148–157. DOI: [10.4236/wjnst.2014.43019](https://doi.org/10.4236/wjnst.2014.43019)

22. Da Silva W.P., da Silva L.D., e Silva C.M.D.P.S., Nascimento P.L. Optimization and Simulation of Drying Processes Using Diffusion Models: Application to Wood Drying Using Forced Air at Low Temperature. *Wood Science and Technology*, 2011, vol. 45, iss. 4, pp. 787–800. DOI: [10.1007/s00226-010-0391-x](https://doi.org/10.1007/s00226-010-0391-x)

23. Da Silva W.P., e Silva C.M.D.P.S., Rodrigues A.F., de Figueirêdo R.M.F. One-Dimensional Numerical Solution of the Diffusion Equation to Describe Wood Drying: Comparison with Two- and Three-Dimensional Solutions. *Journal of Wood Science*, 2015, vol. 61, iss. 4, pp. 364–371. DOI: [10.1007/s10086-015-1479-6](https://doi.org/10.1007/s10086-015-1479-6)
24. Espinoza O., Bond B. Vacuum Drying of Wood – State of the Art. *Current Forestry Reports*, 2016, vol. 2, iss. 4, pp. 223–235. DOI: [10.1007/s40725-016-0045-9](https://doi.org/10.1007/s40725-016-0045-9)
25. Garg H. A Linear Programming Method Based on an Improved Score Function for Interval-Valued Pythagorean Fuzzy Numbers and Its Application to Decision-Making. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 67–80. DOI: [10.1142/S0218488518500046](https://doi.org/10.1142/S0218488518500046)
26. Gour A., Pardasani K.R. Statistical and Soft Fuzzy Set Based Analysis of Amino Acid Association Patterns in Peptide Sequence of Swine Influenza Virus. *Advanced Science, Engineering and Medicine*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 137–144. DOI: [10.1166/asem.2018.2118](https://doi.org/10.1166/asem.2018.2118)
27. Jia X., Hayashi K., Zhan J., Cai Y. The Moisture Transfer Mechanism and Influencing Factors in Wood during Radio-Frequency/Vacuum Drying. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2016, vol. 74, iss. 2, pp. 203–210. DOI: [10.1007/s00107-015-0985-y](https://doi.org/10.1007/s00107-015-0985-y)
28. Lin J.-J., Chuang C.-J., Ko C.-F. Applying GA and Fuzzy Logic to Breakdown Diagnosis for Spinning Process. *Intelligent Information Management*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 21–38. DOI: [10.4236/iim.2017.91002](https://doi.org/10.4236/iim.2017.91002)
29. Mamdani E.H. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. *IEEE Transactions on Computers*, 1977, vol. 26, no. 12, pp. 1182–1191. DOI: [10.1109/TC.1977.1674779](https://doi.org/10.1109/TC.1977.1674779)
30. MATLAB Release Notes for R2008a. *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/matlab/release-notes.Highlight> (accessed 15.02.19).
31. Miranda G.H.B., Felipe J.C. Computer-Aided Diagnosis System Based on Fuzzy Logic for Breast Cancer Categorization. *Computers in Biology and Medicine*, 2015, vol. 64, pp. 334–346. DOI: [10.1016/j.combiomed.2014.10.006](https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2014.10.006)
32. Moises S.A., Pereira S. do L. Dealing with Empty and Overabundant Answers to Flexible Queries. *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 12–18. DOI: [10.4236/jdaip.2014.21003](https://doi.org/10.4236/jdaip.2014.21003)
33. Nakagawa K., Tamura A., Adachi S. Optimization of Food Dye (Betanin) Retention during Hot Air Drying: Design Space Calculation with Consideration of Reaction and Substrate Transfer Kinetics. *Drying Technology*, 2018, vol. 36, iss. 15, pp. 1920–1929. DOI: [10.1080/07373937.2018.1463538](https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1463538)
34. Ntaganda J.M., Hagggar M.S.D., Mampassi B. Fuzzy Logic Strategy for Solving an Optimal Control Problem of Therapeutic Hepatitis C Virus Dynamics. *Open Journal of Applied Sciences*, 2015, vol. 5, no. 9, pp. 527–541. DOI: [10.4236/ojapps.2015.59051](https://doi.org/10.4236/ojapps.2015.59051)
35. Obataya E., Higashihara T. Reversible and Irreversible Dimensional Changes of Heat-Treated Wood during Alternate Wetting and Drying. *Wood Science and Technology*, 2017, vol. 51, iss. 4, pp. 739–749. DOI: [10.1007/s00226-017-0918-5](https://doi.org/10.1007/s00226-017-0918-5)
36. Ouertani S., Koubaa A., Azzouz S., Hassini L., Dhib K.B., Belghith A. Vacuum Contact Drying Kinetics of Jack Pine Wood and Its Influence on Mechanical Properties: Industrial Applications. *Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 51, iss. 7, pp. 1029–1039. DOI: [10.1007/s00231-014-1476-0](https://doi.org/10.1007/s00231-014-1476-0)
37. Ouertani S., Koubaa A., Soufien A., Rim B., Lamine H., Belghith A. Microwave Drying Kinetics of Jack Pine Wood: Determination of Phytosanitary Efficacy, Energy Consumption, and Mechanical Properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, iss. 4, pp. 1101–1111. DOI: [10.1007/s00107-018-1316-x](https://doi.org/10.1007/s00107-018-1316-x)
38. Perez O. Fuzzy Law: A Theory of Quasi-Legal Systems. *Canadian Journal of Law & Jurisprudence*, 2015, vol. 28, iss. 2, pp. 343–370. DOI: [10.1017/cjlj.2015.31](https://doi.org/10.1017/cjlj.2015.31)
39. Phonetip K., Ozarska B., Brodie G.I. Comparing Two Internal Check Measurement Methods for Wood Drying Quality Assessment. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2017, vol. 75, iss. 1, pp. 139–142. DOI: [10.1007/s00107-016-1115-1](https://doi.org/10.1007/s00107-016-1115-1)

40. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control*. Heidelberg, Physica-Verlag, 2001. 760 p. DOI: [10.1007/978-3-7908-1824-6](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6)
41. Prakash O., Ranjan S., Kumar A., Tripathy P.P. Applications of Soft Computing in Solar Drying Systems. *Solar Drying Technology*. Ed. by O. Prakash, A. Kumar. Singapore, Springer, 2016, pp. 419–430. DOI: [10.1007/978-981-10-3833-4_14](https://doi.org/10.1007/978-981-10-3833-4_14)
42. Safin R.R., Khasanshin R.R., Khakimzyanov I.F., Mukhametzyanov Sh.R., Kainov P.A. Increasing the Energy Efficiency of the Process of Oscillating Vacuum-Conductive Drying of Wood by Means of a Heat Pump. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, iss. 2, pp. 310–317. DOI: [10.1007/s10891-017-1569-y](https://doi.org/10.1007/s10891-017-1569-y)
43. Schneider J., Urban R. A Proof of Donsker's Invariance Principle Based on Support Functions of Fuzzy Random Vectors. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 27–42. DOI: [10.1142/S0218488518500022](https://doi.org/10.1142/S0218488518500022)
44. Shtovba S., Rotshtein A., Pankevich O. Fuzzy Rule Based System for Diagnosis of Stone Construction Cracks of Buildings. *Advances in Computational Intelligence and Learning*. Ed. by H.J. Zimmermann, G. Tselentis, M. van Someren, G. Dounias. Dordrecht, Springer, 2002, pp. 401–412. DOI: [10.1007/978-94-010-0324-7_28](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0324-7_28)
45. Simulink Release Notes for R2008a. *MathWorks*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/simulink/release-notes.Highlight> (accessed 15.02.19).
46. Situmorang Z., Situmorang J.A. Intelligent Fuzzy Controller for a Solar Energy Wood Dry Kiln Process. *2015 International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering & Environment (TIME-E), September 7–9, 2015*. Samosir, Indonesia, 2015, pp. 152–157. DOI: [10.1109/TIME-E.2015.7389765](https://doi.org/10.1109/TIME-E.2015.7389765)
47. Situmorang Z., Wardoyo R., Hartati S., Istiyanto J.E. The Schedule of Optimal Fuzzy Controller Gain with Multi Model Concept for a Solar Energy Wood Drying Process Kiln. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 2009, vol. 15, no. 2, pp. 137–151.
48. Sychevskii V.A. Heat and Mass Transfer in Convective Wood-Drying Plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, iss. 3, pp. 705–771. DOI: [10.1007/s10891-018-1793-0](https://doi.org/10.1007/s10891-018-1793-0)
49. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, vol. SMC-15, iss. 1, pp. 116–132. DOI: [10.1109/TSMC.1985.6313399](https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399)
50. Uraon K.K., Kumar S. Analysis of Defuzzification Method for Rainfall Event. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2016, vol. 5, iss. 1, pp. 341–354.
51. Xu W., Liu G., Yu X. A Binomial Tree Approach to Pricing Vulnerable Option in a Vague World. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 143–162. DOI: [10.1142/S0218488518500083](https://doi.org/10.1142/S0218488518500083)
52. Yue H., Li J., Shi J., Yang W. Adaptive Fuzzy Tracking Control for Stochastic Nonlinear Systems with Time-Varying Input Delays Using the Quadratic Functions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2018, vol. 26, no. 01, pp. 109–142. DOI: [10.1142/S0218488518500071](https://doi.org/10.1142/S0218488518500071)
53. Zadeh L.A. Fuzzy Sets. *Information and Control*, 1965, vol. 8, iss. 3, pp. 338–353. DOI: [10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
54. Zadeh L.A. Fuzzy Logic. *Computer*, 1988, vol. 21, no. 4, pp. 83–93. DOI: [10.1109/2.53](https://doi.org/10.1109/2.53)
55. Zhao Y., Zhihui W., Iida I., Huang R., Lu J., Jiang J. Studies on Pre-Treatment by Compression for Wood Drying I: Effects of Compression Ratio, Compression Direction and Compression Speed on the Reduction of Moisture Content in Wood. *Journal of Wood Science*, 2015, vol. 61, iss. 2, pp. 113–119. DOI: [10.1007/s10086-014-1451-x](https://doi.org/10.1007/s10086-014-1451-x)
56. Zhou Z., Wang K. Sliding Mode Controller Design for Wood Drying Process. *Wood Science and Technology*, 2018, vol. 52, iss. 4, pp. 1039–1048. DOI: [10.1007/s00226-018-1006-1](https://doi.org/10.1007/s00226-018-1006-1)

MODELING THE PROCESS OF SAWN TIMBER DRYING

*A.G. Gorokhovskiy, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-6030-2018](#),
ORCID: [0000-0001-8847-8217](#)*

*V.V. Pobedinsky, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [G-3245-2018](#),
ORCID: [0000-0001-6318-3447](#)*

*E.E. Shishkina, Doctor of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [O-6021-2018](#),
ORCID: [0000-0002-2584-4897](#)*

*E.V. Pobedinskiy, Postgraduate Student; ResearcherID: [R-2080-2018](#),
ORCID: [0000-0003-1838-309X](#)*

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: pobed@el.ru

The article considers the problem of sawn timber drying. The relevance of research is driven by the need to improve the automated process control system for drying sawn timber on the basis of modern information technologies, as well as to reduce the energy intensity of these technologies, which is enshrined in the program documents of forest industry development at the government level. The functional purpose of the automated control system is to provide a set level of the wood moisture content with the required quality of wood (zero ruptures). It is of immense complexity to obtain such functional dependency on the heating temperature in the chamber and the equilibrium air humidity by traditional statistical methods due to the uncertainty conditions of parameters, therefore, the apparatus of the fuzzy set theory should be used. Thus, the research purpose included generation of functional dependences of the sawn timber moisture content and drying time on the heating temperature and the equilibrium air humidity in the drying chamber based on fuzzy inference. The methodological basis of the theoretical studies was as follows: the theory of drying; the provisions of mathematical and fuzzy modeling; and, in terms of checking the adequacy of the proposed fuzzy model, the methods of mathematical statistics and experimental theory. The research results are the obtained dependences of the moisture content of sawn timber and drying time on the heating temperature and the equilibrium air humidity in the drying chamber, the synthesis of which is performed by means of Fuzzy Logic Toolbox of MATLAB application. The proposed functions of the moisture content and sawn timber drying time take into account the basic process configurations (the heating temperature and the equilibrium air humidity) and are experimentally verified for adequacy. The practical applicability of the results lies in the possibility of creating an intelligent system of automatic control of the sawn timber drying process.

For citation: Gorokhovskiy A.G., Pobedinsky V.V., Shishkina E.E., Pobedinskiy E.V. Modeling the Process of Sawn Timber Drying. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2020, no. 1, pp. 154–166. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166

Keywords: wood drying, wood moisture content, equilibrium air humidity, fuzzy modeling, fuzzy inference.

Поступила 15.02.19 / Received on February 2, 2019
