

УДК 674.047.3, 510.644.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500
Шифр специальности ВАК: 2.3.2, 2.3.3

Синтез алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов

В.В. Гречушников[✉], А.А. Шилин, С.В. Прохоров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

[✉]grechvv@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Процесс сушки пиломатериалов связан с большими рисками получения некачественного продукта. Зачастую проблема может скрываться в нарушении технологического процесса и в неправильной настройке параметров режимов сушки на разных ее этапах. Решением может являться контроль работы и подстройка оптимальных параметров работы сушки для минимизации брака. Процедура автоматизированной подстройки параметров обычно связана с оценкой специалистом качества продукта, по которой следует принять решение по определению параметров с учетом признаков нарушения технологического процесса. В технических и научных изданиях присутствует обобщенная информация о методах подбора параметров для различных ситуаций, которую можно формализовать и включить в алгоритмы подстройки параметров программируемого логического контроллера. В статье освещен алгоритм подбора оптимальных параметров работы сушки с использованием Fuzzy-контроллера. **Цель:** создать алгоритм с использованием Fuzzy-контроллера, который позволяет настроить параметры техпроцесса и адаптировать параметры режима к сушильной камере в заданных условиях эксплуатации. **Методы:** анализ базы данных о техпроцессах, полученных в течение полутора лет работы системы диспетчеризации основных параметров для 28 полных циклов сушки пиломатериала. **Результаты.** Сформирован алгоритм автоматизированной подстройки параметров для трех этапов сушки на основании результатов опроса заказчика и технолога (оператора сушильной камеры) о качестве продукта, позволяющий снизить вероятность получения некачественного продукта, а также стимулировать обслуживающий персонал к корректному формированию паспорта технологического процесса. **Выводы.** Включение в цепь управления автоматизированного контура подстройки параметров позволяет минимизировать количество некачественных процессов при начале эксплуатации новой камеры сушки и исключить брак в ходе дальнейших технологических процессов.

Ключевые слова: сушка пиломатериалов, нечеткая логика, дефекты сушки, ступенчатая сушка, подстройки технологических параметров

Для цитирования: Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Синтез алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500

UDC 674.047.3, 510.644.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500

Synthesis of an algorithm for automated adjustment of lumber drying based on linguistic information

V.V. Grechushnikov[✉], A.A. Shilin, S.V. Prokhorov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

[✉]grechvv@tpu.ru

Abstract. Relevance. Lumber drying is associated with high risks of obtaining a low-quality or even unusable product. The problem under consideration has a number of reasons, both in violation of the technological process and in incorrect settings

of drying mode parameters at different stages. The procedure for automated adjustment of parameters is usually associated with a linguistic assessment of the quality of the product, according to which a decision on adjusting the parameters should be made, taking into account signs of a violation of the technological process. Technical and scientific publications contain generalized information about methods for selecting parameters for various situations, which can be formalized and included in algorithms for adjusting the parameters of a programmable logic controller. **Aim.** To create an algorithm using a Fuzzy controller that allows you to configure process parameters and adapt the drying chamber to the optimal parameters for drying lumber under given operating conditions. **Methods.** Analysis of the technical process database obtained during one and a half years of operation of the main parameters dispatch system for 28 full lumber drying cycles, with the aim of forming an automated adjustment algorithm that takes into account the lumber drying conditions. **Results.** The authors have created an algorithm for automated adjustment of parameters for three stages of drying based on linguistic ideas about the quality of the product. The algorithm eliminates the possibility of obtaining a low-quality product, as well as encourages service personnel to correctly generate a technological process passport. **Conclusions.** The inclusion of an automated parameter adjustment loop in the control circuit allows us to minimize the number of poor-quality processes when starting to operate a new drying chamber and eliminate defects in further technical processes.

Keywords: Drying lumber, fuzzy logic, drying defects, step drying, adjusting technological parameters

For citation: Grechushnikov V.V., Shilin A.A., Prokhorov S.V. Synthesis of an algorithm for automated adjustment of lumber drying based on linguistic information. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500

Введение

В синтезе системы управления процессом сушки пиломатериалов основной задачей является правильный выбор параметров камеры сушки. К таким параметрам относятся: величина температуры (T , °C) и значение психрометрической разности (ΔT , °C) в камере на каждом этапе. При первом пуске сушильной камеры параметры необходимо выбрать таким образом, чтобы минимизировать порчу пиломатериалов. Для этих целей существует множество рекомендаций [1–8], основанных на математических моделях и расчетах [9–18].

На результат сушки влияет огромное количество параметров, которые практически невозможно учесть, поскольку влияние может оказывать как характерный климат местности, влажность воздуха и

его температура и т. п., так и место произрастания леса и многое другое [9]. Производители автоматизированных сушильных камер [6, 19–21] рекомендуют проводить процедуру подбора параметров T и ΔT на стартовых пробных сушках, т. к. пробная сушка может дать неудачный результат вплоть до частичной порчи материала. Это связано с тем, что контроллер сушильной камеры настроен на заданное количество ступеней с определенными величинами времени сушки, температуры и психрометрической разности. Например, для сушки березы толщиной 53 мм, шириной 150 мм начальной влажностью 60 % при мягком режиме сушки на вторую категорию предлагается использовать технологическую карту, представленную в табл. 1 [6].

Таблица 1. Режим сушки пиломатериалов в сушильной камере периодического действия

Table 1. Lumber drying mode in a batch drying chamber

Технологическая операция Technological operation	T , °C	Относительная влажность, % Relative humidity, %	ΔT , °C	Время, ч Time, h	Влажность древесины, % Wood moisture content, %
Нагрев пиломатериалов Lumber heating	60	100	0	4	естественная natural
Сушка – 1 ступень Drying – 1 st stage	52	80	4	60–75	от естественной до 30 from natural to 30
Сушка – 2 ступень Drying – 2 nd stage	55	68	7	60–75	от 30 до 20 from 30 to 20
Промежуточная влаготеплообработка Intermediate moisture-heat treatment	70	100	0	6	при 20/at 20
Сушка – 3 ступень Drying – 3 rd stage	70	31	22	60–96	до заданной 10 up to the specified 10
Конечная влаготеплообработка Final moisture-heat treatment	78	96	1	12	10
Кондиционирование Conditioning	70	74	5	12	заданная/specified
Охлаждение пиломатериалов Lumber cooling	<30–40	20–40	≥ 20	6	заданная/specified

На основании большого опыта сушки пиломатериалов в сушильных камерах известно, что процесс сушки протекает неравномерно и его можно условно разделить на следующие фазы (технологические операции).

Первой фазой является *прогрев древесины*. В зависимости от времени года длительность данного этапа составляет от часа до полутора часов летом и полтора–два зимой (для мягких хвойных пород) на каждый сантиметр толщины материала. Данный этап протекает при высокой относительной влажности, вплоть до 100 %. Это связано с необходимостью замедления влагоотдачи с поверхности материала. Переход от прогрева к непосредственной сушке рекомендуется проводить равномерно и постепенно.

Следующими технологическими операциями являются три или более ступени сушки. Рассмотрим трехступенчатый процесс.

На *первой ступени* скорость сушки постоянна и определяется интенсивностью испарения влаги с поверхности материала. Отклонения температуры допускаются в пределах $\pm 2^\circ\text{C}$ от заданной режимом, а если требования к качеству материала низки – вплоть до $\pm 5^\circ\text{C}$ [5]. При этом пересыхание верхних слоев древесины обусловлено, в первую очередь, величиной психрометрической разности, а не температурой. В зависимости от пиломатериала, трудносохнувший или среднесохнувший, допускается отклонение ΔT не более чем на $\pm 0,1$ и $\pm 0,2^\circ\text{C}$ от ее величины, соответственно [5]. На этом этапе влажность древесины снижается от естественной до 35 %. Данный этап является самым важным, при несоблюдении или неправильно подобранных параметрах режима на материале могут возникнуть различные дефекты.

На *второй ступени* сушки также существует вероятность порчи пиломатериалов, но она ниже. На этом этапе удаляется как свободная влага внутренних слоев, так и связанная влага стенок клеток наружных слоев пиломатериала, в результате чего процесс сушки протекает наиболее интенсивно. В свою очередь, влажность древесины снижается с 35 до 25 %.

Чтобы удалить связанную влагу и снизить влажность материалов с 25 % до заданной, например, до 10 %, переходят к *третьей ступени*. Она характеризуется высоким значением психрометрической разности (16°C и выше). Процесс протекает значительно медленнее, чем на втором этапе. Возникновение трещин на этом этапе обусловлено слишком большими значениями температуры (свыше сотни градусов), в то время как величина психрометрической разности оказывает малое влия-

ние на появление дефектов и может достигать величины 20°C и более.

К финальным стадиям сушки относятся процессы: *конечная влаготеплообработка, кондиционирование, охлаждение пиломатериалов*. На данных этапах дефекты в виде трещин могут возникнуть из-за перепада температуры, возникающего при преждевременной выгрузке еще не остывших пиломатериалов из сушильной камеры (эксплуатационная ошибка).

В работах [5, 6, 22–26] рассматриваются дефекты, которые могут произойти с древесиной при сушке, и причины их возникновения. В табл. 2 представлены общие рекомендации по направлению изменения параметров T и ΔT относительно текущего значения, которое не указывается в самой таблице и зависит от типа древесины, толщины пиломатериала и других параметров. При начале эксплуатации новой сушильной камеры рекомендуются относительно «безопасные» величины T и ΔT , при которых появление дефектов минимально, а скорость сушки не оптимальна. Установленные значения параметров указаны в табл. 1 для конкретных условий определенной камеры производителя. Данные параметры могут не соответствовать корректному функционированию новой камеры и их необходимо изменять. В данной работе высокой считается величина температуры или относительной влажности, значение которых превышает указанные в технологической карте, малой – меньше величин технологической карты.

В табл. 2 также указаны дефекты, связанные с появлением трещин или плесени. Всего выделяют пять основных причин возникновения дефектов:

- 1) высокая скорость сушки, низкая относительная влажность (большая величина T и ΔT);
- 2) низкая скорость сушки, высокая относительная влажность (малая величина T и ΔT);
- 3) неправильно выполненное штабелирование;
- 4) ошибки эксплуатации сушильной камеры;
- 5) другие причины, зависящие от свойств древесины.

В табл. 2 булевы величины представлены знаками: «✓» – да; «–» – нет.

На основании табл. 2 и технологических карт процесса камерной сушки древесины [1–8] можно сделать предположение, что существует определенная «Безопасная область» (рис. 1), в которой при любых сочетаниях величин температуры и психрометрической разности на пиломатериале не возникают дефекты, но при этом скорость сушки может не быть оптимальной. Также внутри данной области может быть определена «Оптимальная область» (рис. 1), в которой не возникают дефекты и скорость сушки максимальна.

Таблица 2. Причины возникновения дефектов при сушке

Table 2. Causes of drying defects

Дефект Defect	Большая величина T и ΔT Large value of T and ΔT	Малая величина T и ΔT Small value of T and ΔT	Неправильно выполненное штабелирование Incorrect stacking	Ошибки эксплуатации Operation errors	Причины, зависящие от свойств древесины Reasons depending on wood properties
Растрескавшиеся сучки, торцевые трещины Cracked knots, end check	✓	–	–	–	–
Сколы и расщепы Chips and splinters	✓	–	–	–	Напряжение в древесине, сжатие древесины, молодая древесина Tension in wood, compression of wood, young wood
Внутренние трещины Internal cracks	✓	–	–	Слишком высокая температура при влажности древесины более 30 % Temperature is too high when the wood moisture content is more than 30%	Бактериальное заражение древесины Bacterial contamination of wood
Поверхностные трещины Surface cracks	✓	✓	–	Слишком высокая начальная температура Initial temperature is too high	
Синие грибковые пятна, плесень, мучнистая роса, гниль Blue fungal stains, mold, powdery mildew, rot	–	✓	✓	–	–
Кофейные или бурые грибковые пятна Coffee-colored or brown fungal stains	–	✓	✓	✓	Реакция ферментативного окисления под влиянием температуры, атмосферной влажности и влагосодержания древесины. Бактериальное заражение древесины Enzymatic oxidation reaction under the influence of temperature, atmospheric humidity and moisture content of wood. Bacterial contamination of wood
Пятна от прокладочных реек Stains from spacer strips	–	–	✓	Влажные или слишком широкие прокладочные рейки Wet or too wide spacer bars	–
Растрескавшаяся сердцевина, ромбовидность, овальность Cracked core, diamond shape, ovality	–	–	–	–	Разница между радиальной и тангенциальной (боковой) усушкой Difference between radial and tangential (lateral) shrinkage
Торцевые расщепы после сушки End splits after drying	–	–	–	Разница между радиальной и тангенциальной (боковой) усушкой Difference between radial and tangential (lateral) shrinkage	–

Высокая скорость сушки пиломатериалов также достигается благодаря алгоритмам, реализованным в контроллерах сушильных камер. Данные контроллеры с высокой точностью выполняют все технологические операции и поддерживают заданные параметры режима, но не имеют подстройки, основанной на результатах сушки. Как было сказано ранее, даже правильно выбранные величины T и ΔT не гарантируют, что в результате на пиломатериале будет отсутствовать плесень или он будет

равномерно просушен. Это связано с тем, что данные дефекты зависят не только от величин T и ΔT , но и от того, какие прокладочные рейки использовались и на сколько качественно было произведено штабелирование.

В данной работе рассматривается алгоритм, который автоматически может принимать решения по выбору параметров температуры и психрометрической влажности на основании оценки качества укладки пиломатериала и результатов сушки.



Рис. 1. Визуализация оптимальной области на основании табл. 1

Fig. 1. Visualization of the optimal area based on the Table 1

Эти параметры можно оценить, задавая ответственным лицам (оператору сушильной камеры и заказчику) соответствующие вопросы, например, «Присутствуют ли треснувшие доски?», «Оцените, насколько равномерно уложен штабель» и другие. Рассматриваемый алгоритм должен быть автоматизированным и предусматривать возможность фото документирования, на случай возникновения спорных ситуаций. Для того чтобы полученные ответы оценки результата преобразовать в направление изменения параметров режима предлагается использовать нечеткую логику.

В отечественных и зарубежных изданиях [9, 27–39] рассматривается возможность применения нечеткой логики в задачах моделирования процессов сушки пиломатериалов и создания систем управления сушильной камеры. Однако поиск научной литературы по формированию алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов на основании опросов о качестве полученного материала не дал результатов.

Задачей данного исследования является составление алгоритма автоматизированной подстройки технологических параметров процесса сушки на основании опросов заказчика и технолога о фактическом качестве пиломатериала и выполненного штабелирования. Данный алгоритм позволит подстроить параметры режимов сушки под конструктивные и климатические особенности месторасположения сушильной камеры, время года, тип древесины и другие условия эксплуатации, т. е. приспособить камеру к условиям, которые затруднительно учесть при помощи расчетов. В результате снижается время адаптации сушильной камеры и количество брака.

Методы и подходы

Для подстройки технологических параметров сушильной камеры по результатам опросов необходимо провести сбор информации о полученной

продукции. Это предлагается осуществлять при помощи веб интерфейса, содержащего опросный лист. Рассматриваемые вопросы являются предварительными и могут быть изменены в связи с эксплуатационной или другой необходимостью по согласованию с разработчиком.

Первым данный опросный лист заполняет оператор сушильной камеры, при этом возможность запуска сушильной камеры блокируется до тех пор, пока не будут даны ответы на все необходимые вопросы и не будет приложено фото штабеля. Если штабель уложен неравномерно, или равномерность не превышает 80 %, то должно выводиться сообщение «Штабель уложен неравномерно. Проведите повторную укладку».

На этом этапе необходимо ответить на следующие вопросы:

- материал, из которого изготовлены доски (клен, бук, береза и др.);
- геометрические размеры пиломатериала ($Ш \times В \times Г$);
- планируемый сорт пиломатериала (1–4);
- равномерно ли уложен пиломатериал (да/нет);
- оцените, на сколько равномерно уложен пиломатериал (шкала);
- загрузите фото штабеля;
- ФИО оператора;
- время пуска, дата, сезон, погода вводятся автоматически.

Фото штабеля перед сушкой необходимо как для разрешения спорных моментов между заказчиком и исполнителем, так и для формирования четкой границы безопасной зоны. Не стоит исключать того факта, что оператор может каждый раз загружать одно и то же фото, этот момент стоит учесть и ввести верификацию загруженных материалов, например, по цифровой подписи фотографии. Дальнейшее расширение программного обеспечения может заключаться в использовании нейросети для дополнительной проверки и оценки равномер-

ности укладки пиломатериала. Данный вопрос является отдельной задачей и не рассматривается в данной статье.

После окончания процесса сушки оператору необходимо оценить результат и заполнить вторую часть опросного листа, который содержит следующие вопросы:

- Присутствуют ли доски, пораженные плесенью (да/нет).
- Оцените количество досок, пораженных плесенью (шкала).
- Присутствуют ли доски с трещинами/сколами (да/нет).
- Присутствуют ли деформированные доски (да/нет).
- Оцените количество треснувших досок (шкала).
- Оцените продолжительность сушки.
- Укажите другие дефекты (при наличии).
- Загрузите фото досок с дефектами (при наличии).
- ФИО оператора.
- Время остановки, дата и сезон вводятся автоматически.
- Продолжительность сушки вычисляется автоматически.

Для дополнительного подтверждения достоверности и адекватности оценки результатов сушки оператором аналогичный опросный лист необходимо пройти заказчику. Только на основании двух результатов опроса следует принимать решение о выборе режима следующей сушки. В среднем время дискретизации данного алгоритма составляет промежуток от сушки к сушке (около 10–12 дней). Для оценки результатов необходимо доставить материал заказчику и получить его оценку, что увеличивает время дискретизации работы алгоритма. Только при наличии хорошей корреляции оценок между оператором и заказчиком можно будет

быстро формировать новую итерацию подстройки параметров режима сушки.

На рис. 2 представлена структурная схема работы предлагаемого алгоритма. Рассмотрим назначение основных блоков, входящих в состав алгоритма. После проведенной сушки оператор и заказчик заполняют опросный лист о результатах сушки. Их ответы да/нет, много/мало, фото и пр. записываются в базу знаний, также в нее сохраняются величины температур, значения психрометрической разности предыдущего режима. Информация из опросного листа о том, как выполнено штабелирование, какое количество треснувших и пораженных плесенью досок было получено в результате сушки, поступает на блоки нечеткой логики. В блоках FLT_T и FLT_ΔT и FLT_Штабель происходит фаззификация данных опросного листа. Необходимым условием правильной работы алгоритма является запрет обработки и расчета параметров нового режима при неправильно выполненном штабелировании. Это осуществляется перемножением сигналов блоков FLT_T и FLT_ΔT с FLT_Штабель. Далее сигнал усиливается, проходит через интегратор, и полученные величины изменения режима (dT, dΔT) суммируются с исходными, в результате чего создаются параметры нового режима (T', ΔT'). Структура данного алгоритма одинакова для всех трех этапов сушки. Другими словами, для каждого из этапов будут рассчитываться индивидуальные, новые параметры режима при использовании различных коэффициентов усиления. Пример работы алгоритма рассматривается далее в статье.

На основе результатов диссертации [40] был создан контроллер, осуществляющий диспетчеризацию и автоматизацию процесса работы сушильной камеры в г. Томске. Основным недостатком данного контроллера является отсутствие автоматизированной подстройки технологических параметров сушильной камеры на основе результатов сушки.

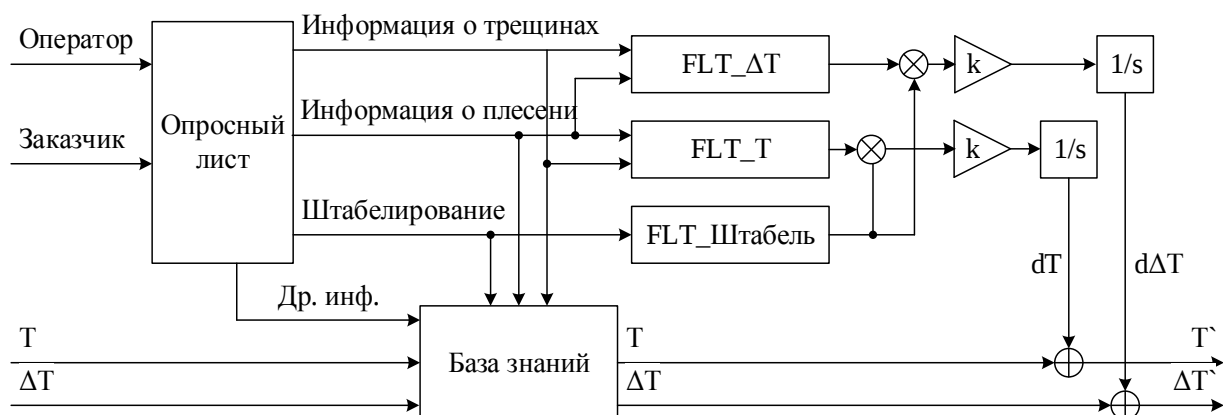


Рис. 2. Структурная схема работы алгоритма

Fig. 2. Block diagram of the algorithm operation

За полтора года работы сушильной камеры была сформирована «База данных» с 28 переходными процессами, включающая в себя данные о продолжительности сушки, величинах температуры и психрометрической разности. Также сформирована «База знаний», отличающаяся от «Базы данных» наличием оценки результатов сушки и включающая в себя только неудачные сушки. Это связано с тем, что при успешной сушке заказчик не обращался к разработчику контроллера, и оценка результата и качества штабелирования не давалась. В связи с этим считаем, что 23 сушки были успешными, а пять с браком, а именно, в трех случаях доски покрылись плесенью, в остальных присутствовали треснувшие доски.

Результаты исследования и их обсуждение

Исходя из переходных процессов и базы знаний о сушках, были рассчитаны величины параметров T и ΔT и сформирована зависимость появления дефектов пиломатериала от параметров режима (рис. 3). Проанализировав полученный результат, можно подтвердить ранее выдвинутое предположение о существовании определенной безопасной зоны, при работе в которой дефекты не проявляются. Для первой ступени (рис. 3, А) данная область довольно узкая, в результате чего небольшое изменение психрометрической разности критически влияет на результат сушки, и режим переходит из области с деформированными или треснувшими досками (зона «Трещины») в область с досками, пораженными плесенью (зона «Плесень»). Для второй ступени (рис. 3, Б) площадь безопасной зоны значительно больше.

Стоит отметить, что на рис. 3, А, Б явно выделяется одна точка, которая находится в безопасной зоне, но в результате были получены доски с пле-

сенью. Поскольку рядом с данной точкой существует множество успешных сушек, можно с большой долей вероятности утверждать, что причина возникновения плесени связана не с технологическими параметрами сушки, а с тем, как было выполнено штабелирование. Данное предположение было добавлено в базу знаний.

Поскольку контроль качества укладки пиломатериалов не учитывался при формировании базы знаний, существует вероятность, что появление плесени в двух других режимах может быть связано как с технологическими параметрами, так и с неправильным штабелированием. Следовательно, полученные зоны имеют только приблизительные очертания. Еще одной причиной размытости полученных зон является тот факт, что невозможно однозначно определить, режим какой из ступеней сушки повлек за собой порчу древесины. Для уточнения размеров и форм зон необходим контроль установки штабеля и большее количество сушек.

На величину психрометрической разности немалое влияние оказывают погодные условия. При низких величинах влажности воздуха внешней среды можно получить большую ΔT в камере и наоборот. На третьей ступени сушки (рис. 3, В) основное количество точек сконцентрировано в диапазоне ΔT равной 16–18 °С. В данном режиме величина температуры не превышала 90 °С в связи с техническими ограничениями котла.

Также стоит отметить, что рассматриваемые зоны получены и справедливы для конкретной сушильной камеры. В зависимости от конструкции, климатических особенностей территории, на которой расположена сушильная камера, времени года, типа леса и других условий зона может перемещаться и изменять свою форму и площадь.

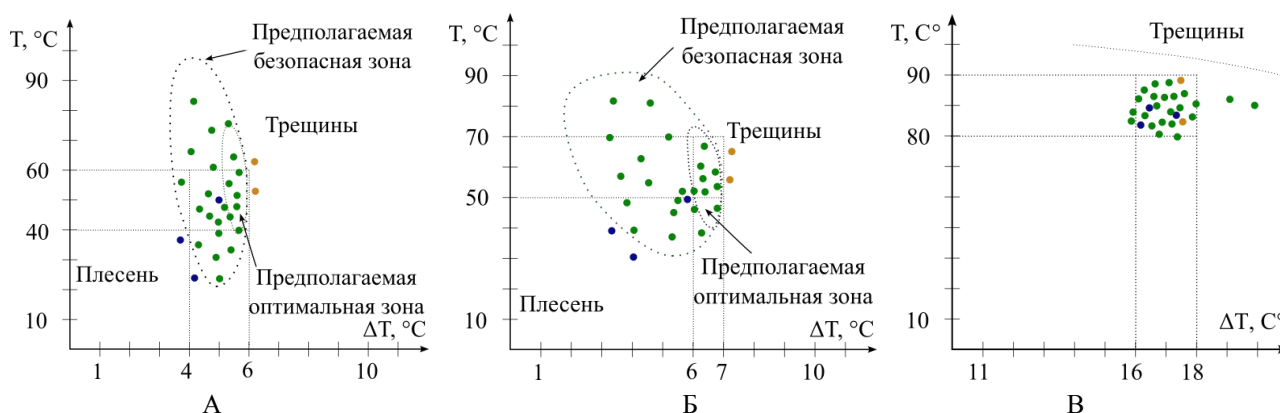


Рис. 3. Зависимость появления дефектов при сушке сибирского кедра от параметров режима: А) первая ступень сушки; Б) вторая ступень сушки; В) третья ступень сушки. Зеленые точки – успешные сушки, оранжевые – сушки с треснувшими досками, синие – пораженные плесенью

Fig. 3. Dependence of appearance of defects when drying Siberian cedar on the drying mode parameters: А) first stage of drying; Б) second stage of drying; В) third stage of drying. Green dots indicate successful drying, orange dots indicate drying with cracked boards, and blue dots indicate mold

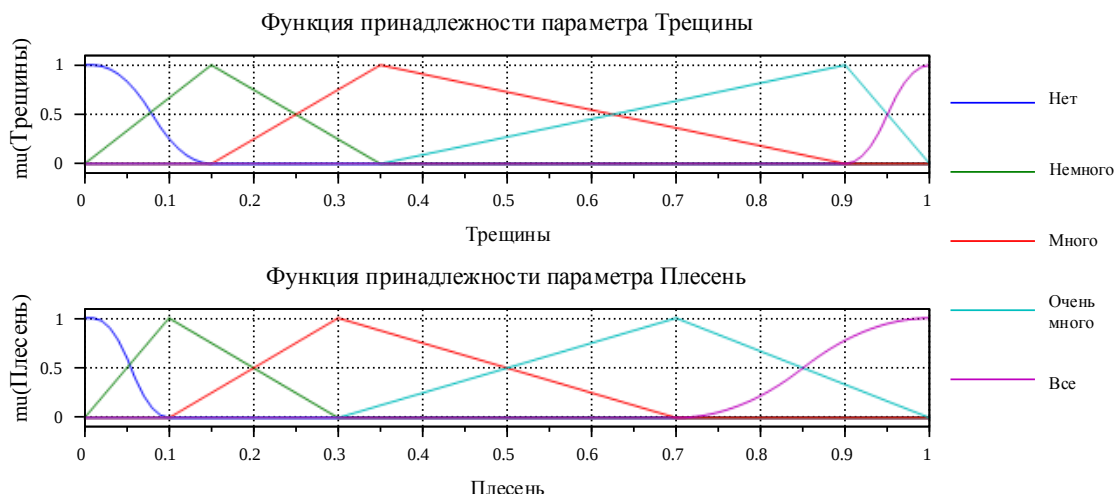


Рис. 4. Функции принадлежности параметров «плесень» и «трещины». «Нет», «немного», «много», «очень много», «все» – являются названиями функций

Fig. 4. Membership functions of parameters «mold» and «cracks». «No», «some», «much», «very much», «all» are the names of the functions

На основании экспертной оценки технолога, работающего с рассматриваемой в данной статье сушильной камерой, были сформированы функции принадлежности параметра оценки относительного количества поврежденного материала плесенью и трещинами (рис. 4), а также правила изменения величины психрометрической разности (табл. 3) первой и второй ступеней сушки. При этом были учтены различные соотношения количества треснувших и пораженных плесенью досок для первого и второго этапов сушки.

Для полного и корректного заполнения всех правил табл. 3 содержит некоторые маловероятные соотношения, такие как случай, при котором все доски одновременно и треснули, и покрылись плесенью.

Величина $k_{\Delta T}$ – коэффициент, показывающий, на сколько необходимо изменить величину параметра психрометрической разности от максимально заданного значения шага. Величина шага для каждой сушильной камеры может быть отличной и должна вычисляться на основании обширной базы знаний о результатах сушки конкретной рассматриваемой камеры. В данной работе шаг был принят равным 2,5 и 1 °C для первой и второй ступени сушки соответственно и определялся исходя из ширины безопасной зоны, что соответствует коэффициенту $k_{\Delta T}$ равному единице.

Таким образом, табл. 3 сформирована на основании экспертной оценки технолога, производящего сушку пиломатериалов. Регулятор Fuzzy-контроллера формирует аппроксимацию решения эксперта (производит дефазификацию) в виде трехмерных поверхностей (рис. 5).

Табл. 3. Правила изменения величины психрометрической разности первой и второй ступеней сушки для различных соотношений количества трещин и плесени

Table 3. Rules for changing the value of the psychrometric difference between the first and second stages of drying for different ratios of the number of cracks and mold

Правило № Rule no.	Трещины Cracks	Плесень Mold	$k_{\Delta T1}$	$k_{\Delta T2}$	Весовой коэффициент Weight coefficient
1	Нет No	Нет/No	0,1	0,1	1
2		Немного/Some	0,2	0,2	
3		Много/Much	0,4	0,3	
4		Очень много/Very much	1	0,5	
5		Все/All	1	0,5	
6	Немного Some	Нет/No	-0,1	-0,2	
7		Немного/Some	0,15	-0,1	
8		Много/Much	0,35	0,05	
9		Очень много/Very much	0,7	0,1	
10		Все/All	0,7	0,1	
11	Много Much	Нет/No	-0,2	-0,3	
12		Немного/Some	0,1	-0,2	
13		Много/Much	0,3	-0,15	
14		Очень много/Very much	0,6	-0,1	
15		Все/All	0,6	-0,1	
16	Очень много Very much	Нет/No	-0,5	-0,9	
17		Немного/Some	0,05	-0,7	
18		Много/Much	0,25	-0,6	
19		Очень много/Very much	0,5	-0,5	
20		Все/All	0,5	-0,5	
21	Все All	Нет/No	-0,5	-0,9	
22		Немного/Some	0,05	-0,7	
23		Много/Much	0,25	-0,6	
24		Очень много/Very much	0,5	-0,5	
25		Все/All	0,5	-0,5	

Они позволяют распространить решения эксперта на всю область изменения параметров режима. На основании криволинейных функций можно определить, как необходимо изменить величину психрометрической разности следующей сушки для увеличения ее быстродействия при любом соотношении количества деформированных и пораженных плесенью досок. Аналогичным образом получаются поверхности изменения параметра температуры. Поверхности являются функциями, определяющими направление и амплитуду изменения основных параметров T и ΔT .

Рассмотрим работу алгоритма на примере первой ступени сушки, при котором образовалась плесень на высушенных досках. Исходными данными для работы алгоритма является информация о предшествующем режиме ($\Delta T=4,1$ °C и $T=23,7$ °C) и результат экспертной оценки технолога, который оце-

нил, что порядка 15 % досок были поражены плесенью при правильно выполненном штабелировании (табл. 4). Информация о количестве брака поступает на вход FLT_T и FLT_ΔT блоков нечеткой логики (рис. 2). В данных блоках после выполненной фазификации на основании функций принадлежности (рис. 4) с последующей дефазификацией на основании поверхностей (рис. 5) определяется доля шага $k_{\Delta T1}=0,26$. Затем $k_{\Delta T1}$ умножается на значение принятого шага (2,5 °C), в результате чего получается величина $d\Delta T$, °C, на которую необходимо изменить параметр режима ΔT для данной конкретной точки. Далее вычисленная величина суммируется с исходными параметрами режима, и определяются параметры следующего режима первой ступени сушки T' и $\Delta T'$. Процесс перерасчета величин T и ΔT для 1 и 2 ступеней аналогичен и различается лишь только поверхностями (рис. 5) и величиной шага.

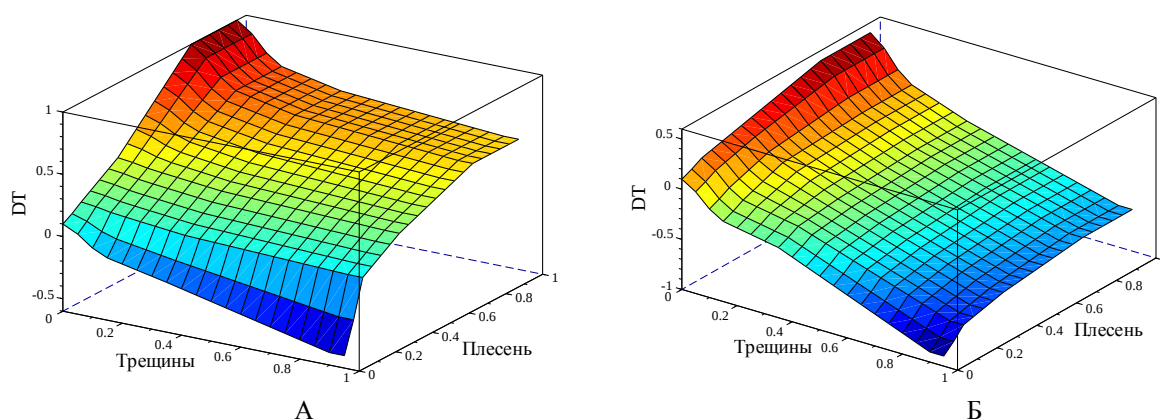


Рис. 5. Полученные в результате дефазификации поверхности изменения параметра ΔT : А) первая ступень сушки; Б) вторая ступень сушки

Fig. 5. Changes of the parameter ΔT obtained as a result of surface dephasification: A) first stage of drying; B) second stage of drying

Таблица 4. Результаты работы алгоритма для первой ступени сушки

Table 4. Results of the algorithm operation for the first stage of drying

Параметры Parameters	Обозначение Designation	Точка/Dot mark						
		1	2	3	4	5	6	7
Параметры режима первой ступени сушки Parameters of the first stage drying mode, °C	ΔT	4,18	3,71	3,75	4,30	5,06	6,22	6,20
	T	23,79	36,51	55,87	63,66	58,44	52,83	62,72
Оценка количества брака Estimation of the quantity of defects, %	Трещины/Cracks	0	0	0	0	0	65	95
	Плесень/Mold	15	27	0	0	0	0	0
Функции принадлежности параметра Трещины Membership functions of parameter Cracks	Нет/No	1	1	1	1	1	0	0
	Немного/Some	0	0	0	0	0	0	0
	Много/Much	0	0	0	0	0	0,25	0
	Очень много/Very much	0	0	0	0	0	0,75	0,47
	Все/All	0	0	0	0	0	0	0,52
Функции принадлежности параметра Плесень Membership functions of parameter Mold	Нет/No	0	0	1	1	1	1	1
	Немного/Some	0,75	0,03	0	0	0	0	0
	Много/Much	0,25	0,97	0	0	0	0	0
	Очень много/Very much	0	0	0	0	0	0	0
	Все/All	0	0	0	0	0	0	0
Шаг/Step	$k_{\Delta T1}$	0,27	0,40	0,10	0,10	0,10	-0,45	-0,49
Величина изменения параметра Parameter change amount	$d\Delta T$, C	0,67	0,99	0,25	0,25	0,25	-1,12	-1,23
Параметры нового режима первой ступени сушки Parameters of the new mode of the first drying stage, °C	$\Delta T'$	4,86	4,70	4,00	4,55	5,31	5,11	4,96
	T'	42,48	48,70	55,68	63,43	58,31	46,85	56,25

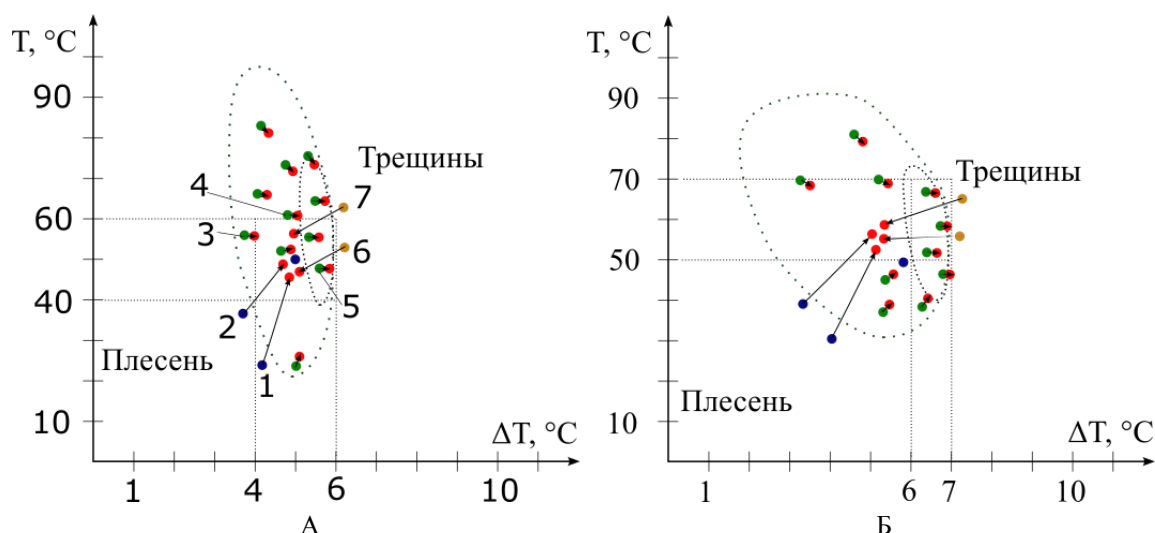


Рис. 6. Результаты работы алгоритма: А) первая ступень сушки; Б) вторая ступень сушки. Зеленые точки – успешные сушки, оранжевые – сушки с треснувшими досками, синие – пораженные плесенью, красные – точки, предложенные алгоритмом

Fig. 6. Algorithm output: А) first stage of drying; Б) second stage of drying. Green dots are successful dryings, orange are dryings with cracked boards, blue are mold, red are dots suggested by the algorithm

Рассматриваемый в статье алгоритм по пересчету T и ΔT , согласно криволинейным функциям, был применен к базе уже имеющихся знаний о результатах предыдущих сушек (рис. 3, А, Б), в результате чего были получены величины T' и $\Delta T'$ (рис. 6) следующих режимов сушки.

Для повышения визуальной наглядности результатов работы алгоритма на рис. 6 представлены только некоторые группы характерных точек режимов:

- 1) неудачные сушки;
- 2) принадлежащие безопасной, но не оптимальной области;
- 3) входящие как в безопасную, так и в оптимальную зоны.

В результате работы алгоритм предлагает параметры следующего режима такими (рис. 6, красные точки), чтобы точки 1, 2 и 6, 7 (табл. 4, рис. 6) из зон, в которых появляются пораженные плесенью и деформированные доски соответственно, гарантированно переместились в безопасную зону. Все точки, находящиеся в безопасной зоне (например, точки 3–5, табл. 4, рис. 6) по результатам работы алгоритма флуктуируют в сторону правой границы зоны, где скорость сушки выше, до появления первых признаков деформации доски. Стоит отметить, что для точки режима с неправильно выполненным штабелированием алгоритм не предлагает нового режима, т. к. вычисления блокируются по признаку укладки пиломатериалов.

Результат работы алгоритма на третьей ступени не приводится в связи с тем, что появление дефектов для данной конкретной сушильной камеры практически невозможно. В случае возникновения дефек-

тов на третьей ступени достаточным воздействием будет ограничение температуры режима работы.

Исходя из полученных результатов, можно сделать предположение, что безопасная зона имеет небольшие размеры. В данном исследовании коэффициент передачи выбирался исходя из ширины безопасной зоны таким, чтобы сильно не влиять на параметры и не выйти за границы рассматриваемой зоны. При наличии большой базы знаний коэффициент передачи можно будет вычислить точнее, т. к. очертания зоны будут более конкретными.

Обязательным условием корректной работы алгоритма является контроль укладки пиломатериалов с выполнением фотофиксации. Это необходимо как для разрешения спорных ситуаций, так и для качественного анализа режимов.

Другим важным условием является корректное и своевременное заполнение опросного листа через веб-интерфейс как оператором сушки, так и заказчиком. Следует учесть тот факт, что заказчик может не оценивать результат сушки, в связи с чем время итераций данного алгоритма сильно увеличивается вплоть до потери информации о сушке. Поэтому вопрос оценки качества полученных пиломатериалов является крайне важным, данный вопрос необходимо учитывать при заключении договоров.

Стоит обратить внимание на правило № 1 (табл. 3). В процессе исследования камеры сушки с целью определения границ оптимальной зоны и наибольшего быстрого действия коэффициент $k_{\Delta T}$ отличен от нуля, что приводит к медленному приближению к краю оптимальной зоны, а в последующем к появлению незначительных трещин в ре-

зультате сушки. При использовании алгоритма, рассматриваемого в данной статье, в процессе адаптации камеры возможна необходимость уменьшения коэффициента $k_{\Delta T}$, а в дальнейшем и обнуление при достижении результатов, удовлетворяющих производителя.

Заключение

В результате работы был создан алгоритм, который позволяет определить направление изменения параметров сушки и собрать базу знаний на основании опроса заказчика и технолога о результатах сушки, по которой можно определить безопасную и оптимальную области сушки пиломатериала заданных параметров. Полученные данные справедливы для автоматизированной сушильной камеры, установленной на одной из площадок г. Томска, и могут отличаться в случае применения других сушильных камер и других климатических условий. Чем больше будет проведено сушек с последующей их оценкой, тем более точно будет определена граница безопасной зоны. Данная информация расширяет понимание о том, какие режимы являются наиболее опасными с точки зрения потери сырья. Во всех режимах учтены условия, которые затруднительно предусмотреть при помощи расчетов. К таким условиям относятся конструктивные особенности сушильной камеры, характерный климат местности, где расположено предприятие, время года, тип древесины и другие условия эксплуатации.

Формирование паспорта технологического процесса на основании заполненных опросных листов

от оператора сушильной камеры и заказчика, данных о предшествующем режиме сушки, позволит при помощи алгоритма, реализованного на Fuzzy-контроллере, настроить параметры техпроцесса и приспособить сушильную камеру к оптимальным параметрам сушки пиломатериалов в заданных условиях эксплуатации.

Предложенный алгоритм можно реализовать с помощью контроллера, который формирует базу знаний, изменяя параметры режима. При накоплении достаточной базы станет более очевидной безопасная зона, и таким образом можно будет вычислить коэффициенты передачи и ввести обратную связь. При наличии данной связи в зависимости от того, в какой точке зоны находится исходный режим, будут применяться различные коэффициенты усиления, и чем дальше режим находится от правой границы безопасной зоны, тем с большей скоростью точки передвигаются в её сторону. В результате чего станет возможным уточнить границы не только безопасной, но и оптимальной области, в которой, предположительно, достигается наибольшее быстроедействие при отсутствии дефектов на пиломатериалах.

Дальнейшее усовершенствование программного обеспечения может заключаться в использовании нейросети для дополнительной проверки и оценки равномерности укладки пиломатериала по фотографиям штабеля, загруженным в опросный лист, на этапе пуска сушильной камеры. Данная мера сделает необходимым выполнять этап корректно, предотвращая одну из причин возникновения плесени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18867-84. Пиломатериалы хвойных пород. Режимы сушки в противоточных камерах непрерывного действия. – М.: Стандартинформ, 2005. – 8 с.
2. ГОСТ 19773-84. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия. – М.: Стандартинформ, 2009. – 14 с.
3. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки пиломатериалов. – Архангельск: ОАО «Научдревпром – ЦНИИМОД», 2000. – 125 с.
4. Шишкина Е.Е. Сушка пиломатериалов. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. – 49 с.
5. Артеменков А.М. Технология сушки и защиты древесины. – СПб: СПбГЛТУ, 2023. – 52 с.
6. Сушильные камеры для сушки древесины // «СКРОН». URL: <http://www.scron.ru/> (дата обращения 17.01.2024).
7. Кречетов И.В. Сушка и защита древесины. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 328 с.
8. Чемоданов А.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е. Сушка древесины. Справочные материалы. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 220 с.
9. Моделирование процесса сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, В.В. Побединский, Е.Е. Шишкина, Е.В. Побединский // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2020. – № 1. – С. 154–166. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166
10. Baronas R., Ivanauskas F., Sapagovas M. Modelling of wood drying and an influence of lumber geometry on drying dynamics // Nonlinear Analysis: Modelling and Control. – 1999. – Vol. 4. – P. 11–22. DOI: 10.15388/NA.1999.4.0.15247.
11. The moisture transfer mechanism and influencing factors in wood during radio-frequency/vacuum drying / X. Jia, K. Hayashi, J. Zhan, Y. Cai // European Journal of Wood and Wood Products. – 2016. – Vol. 74. – P. 203–210. DOI: 10.1007/s00107-015-0985-y.
12. Sychevskii V.A. Heat and mass transfer in convective wood-drying plants // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. – Vol. 91. – P. 705–771. DOI: 10.1007/s10891-018-1793-0.
13. Mass diffusivity of different species of wood in convective drying / S. Azzouz, K.B. Dhib, R. Bahar, S. Ouertani, M.T. Elaieb, A. Elcafsi // European Journal of Wood and Wood Products. – 2018. – Vol. 76. – P. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.

14. One-dimensional numerical solution of the diffusion equation to describe wood drying: comparison with two- and three-dimensional solutions / W.P. da Silva, C.M.D.P.S. e Silva, A.F. Rodrigues, R.M.F. de Figueirêdo // *Journal of Wood Science*. – 2015. – Vol. 61. – P. 364–371. DOI: 10.1007/s10086-015-1479-6.
15. Меркушев И.М. Психрометрическая диаграмма равновесной влажности древесины // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2010. – № 2. – С. 83–86.
16. Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Гороховский А.А. Оптимизация режимов сушки пиломатериалов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 1. – С. 52–58.
17. Optimization and simulation of drying processes using diffusion models: application to wood drying using forced air at low temperature / W.P. da Silva, L.D. da Silva, C.M.D.P.S. e Silva, P.L. Nascimento // *Wood Science and Technology*. – 2011. – Vol. 45. – P. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.
18. The schedule of optimal fuzzy controller gain with multi model concept for a solar energy wood drying process kiln / Z. Situmorang, R. Wardoyo, S. Hartati, J.E. Istiyanto // *International Journal of Operations and Quantitative Management*. – 2009. – Vol. 15. – P. 137–151.
19. Автоматизация управления сушкой древесины: автоматика для сушильных камер // Учебно-научная лаборатория измерительной техники и автоматизации. URL: <https://esd70.ru/> (дата обращения 17.01.2024).
20. Оборудование для лесозаготовки и деревообработки // Производственная Компания «Ижора». URL: <https://pk-izhora.ru/> (дата обращения 17.01.2024).
21. Сушильные камеры для пиломатериалов // «МАКИЛ ПЛЮС». URL: <https://www.makilplus.ru/> (дата обращения 17.01.2024).
22. 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. – P. 739–749. DOI: 10.1007/s00226-017-0918-5.
23. Меркушев И.М. Динамика бездефектной сушки пиломатериалов // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2011. – № 3. – С. 84–87.
24. Меркушев И.М. Факторы, предопределяющие бездефектную сушку пиломатериалов // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2010. – № 3. – С. 90–93.
25. Зарипов Ш.Г. Систематизация факторов, влияющих на образование трещин в лиственных пиломатериалах при сушке // ИВУЗ. Лесной журнал. – 2018. – № 3 (363). – С. 127–136.
26. Коваль В.С. Торцеве озріскування пиломатеріалів та його запобігання // Лісове і садово-паркове господарство. – 2012. – № 1. – С. 10–17.
27. 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). – Samosir, Indonesia, 2015. – P. 152–157. DOI: 10.1109/TIME-E.2015.7389765.
28. Дивеев А.И., Полтавский А.В., Алхатем А. Нейронечеткое управление процессом сушки пиломатериалов // Надежность и качество сложных систем. – 2021. – № 3 (35). – С. 93–97. DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-12.
29. Турбал Е.Ю., Шифрин Б.М. Сушка пиломатериалов на основе нечеткого регулятора // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ: сборник статей II Международной научно-технической конференции. – Минск, 6–9 декабря 2022. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 160–163.
30. Турбал Е.Ю., Шифрин Б.М., Попова Д.А. Подход к разработке модели сушки пиломатериалов на основе нечеткой логики // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 7-1 (121). – С. 111–114.
31. Савченко Д.В., Резникова К.М., Смышляева А.А. Нечеткая логика и нечеткие информационные технологии // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы». – 2021. – № 1. – Т. 8. – С. 12. URL: <https://resources.today/PDF/10ECOR121.pdf> (дата обращения 17.01.2024).
32. Санаев В.Г., Полещук О.М., Комаров Е.Г. О применении методов нечеткого анализа для прогноза поведения древесины, прошедшей гидротермическую обработку // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2011. – № 3. – С. 148–156.
33. Zakarias Situmorang. Fuzzy rule suram for wood drying // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2017. – Vol. 930. – P. 9. DOI: 10.1088/1742-6596/930/1/012043.
34. Development of an intelligent control system for wood drying processes / X.G. Wang, W. Liu, L. Gu, C.J. Sun, C.E. Gu, C.W. de Silva // 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556). Como, Italy, July 08–12, 2001. – P. 371–376. DOI: 10.1109/AIM.2001.936483.
35. Zakarias Situmorang, Husein A.E. Comparison of intelligent fuzzy controller and fuzzy rule suram algorithms in the drying process // *An International Journal Information Sciences Letters*. – 2023. – Vol. 12. – № 6. – P. 2603–2621. DOI: 10.18576/isl/120656.
36. System identification of wood drying process based on ARMAX model / Z. Zhou, P. Zhang, B. Huai, L. Huang // *Agricultural Sciences*. – 2019. – Vol. 10. – № 3. – P. 241–248. DOI: 10.4236/as.2019.103020.
37. Neuro-fuzzy hybrid system for monitoring wood moisture content during drying / A.J. Vinha Zanuncio, A. Guimarães Carvalho, C.A. Araújo Júnior, M.R. de Assis, L.F. da Silva // *Floresta Ambient*. – 2019. – Vol. 26. – № 2. – P. 5. DOI: 10.1590/2179-8087.050417
38. Li J., Sun L. Forecasting of wood moisture content based on modified ant colony algorithm to optimize LSSVM parameters // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 85116–85127. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991889.
39. Simpson W.T. Dry kiln operators manual. – Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 1991. – 273 p.
40. Нгуен В.В. Метод синтеза регуляторов и алгоритмы контроллера двухканальной системы управления камерой сушки пиломатериала: дис. ...канд. тех. наук. – Томск, 2021. – 159 с.

Информация об авторах

Владислав Викторович Гречушников, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. grechvv@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4827-5906>

Александр Анатольевич Шилин, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. shilin@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Сергей Валерьевич Прохоров, аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. sergei_prohorov@inbox.ru; <http://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Поступила в редакцию: 18.01.2024

Поступила после рецензирования: 22.04.2024

Принята к публикации: 26.04.2024

REFERENCES

1. SS 18867-84. *Softwood lumber. Drying modes in continuous counterflow chambers*. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 8 p. (In Russ.)
2. SS 19773-84. *Coniferous and hardwood lumber. Drying modes in batch chambers*. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 14 p. (In Russ.)
3. *Guiding technical materials on the technology of chamber drying of lumber*. Arkhangelsk, JSC «Nauchdrevprom – TsNIIMOD» Publ., 2000. 125 p. (In Russ.)
4. Shishkina E.E. *Drying lumber: educational manual*. Ekaterinburg, UGFLTU, 2020. 49 p. (In Russ.)
5. Artemenkov A.M. *Technology of drying and protecting wood*. St. Petersburg, SPbGLTU Publ., 2023. 52 p. (In Russ.)
6. Drying chambers for drying wood. «SKRON». (In Russ.) Available at: <http://www.scron.ru/> (accessed 17 January 2024).
7. Krechetov I.V. *Drying and protection of wood*. Moscow, Forestry Industry Publ., 1987. 328 p. (In Russ.)
8. Chemodanov A.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. *Drying wood. Reference materials*. Vologda, Infra-Engineering Publ., 2022. 220 p. (In Russ.)
9. Gorokhovskiy A.G., Pobedinsky V.V., Shishkina E.E., Pobedinsky E.V. Modeling the process of drying lumber. *IVUZ. Forest magazine*, 2020, no. 1, pp. 154–166. (In Russ.) DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-154-166
10. Baronas R., Ivanauskas F., Sapagovas M. Modelling of wood drying and an influence of lumber geometry on drying dynamics. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control*, 1999, vol. 4, pp. 11–22. DOI: 10.15388/NA.1999.4.0.15247.
11. 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, pp. 203–210. DOI: 10.1007/s00107-015-0985-y.
12. Sychevskii V.A. Heat and mass transfer in convective wood-drying plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, vol. 91, pp. 705–771. DOI: 10.1007/s10891-018-1793-0.
13. 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, pp. 573–582. DOI: 10.1007/s00107-017-1212-9.
14. 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, pp. 364–371. DOI: 10.1007/s10086-015-1479-6.
15. Merkushev I.M. Psychrometric diagram of the equilibrium moisture content of wood. *IVUZ. Forest magazine*, 2010, no. 2, pp. 83–86. (In Russ.)
16. Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Gorokhovskiy A.A. Optimization of lumber drying modes. *Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Radio engineering and infocommunication systems*, 2011, no. 1, pp. 52–58. (In Russ.)
17. 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, pp. 787–800. DOI: 10.1007/s00226-010-0391-x.
18. 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, pp. 137–151.
19. Automation of wood drying control: automation for drying chambers. *Educational and Scientific Laboratory of Measuring Equipment and Automation*. (In Russ.) Available at: <https://esd70.ru/> (accessed 17 January 2024).
20. Equipment for logging and woodworking. *Production Company «Izhora»*. (In Russ.) Available at: <https://pk-izhora.ru/> (accessed 17 January 2024).
21. Drying chambers for lumber. «MAKIL PLUS». (In Russ.) Available at: <https://www.makilplus.ru/> (accessed 17 January 2024).
22. 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, pp. 739–749. DOI: 10.1007/s00226-017-0918-5.
23. Merkushev I.M. Dynamics of defect-free drying of lumber. *IVUZ. Forest magazine*, 2011, no. 3, pp. 84–87. (In Russ.)
24. Merkushev I.M. Factors predetermining defect-free drying of lumber. *IVUZ. Forest magazine*, 2010, no. 3, pp. 90–93. (In Russ.)

25. Zaripov Sh.G. Systematization of factors influencing the formation of cracks in larch lumber during drying *IVUZ. Forest magazine*, 2018, no. 3 (363), pp. 127–136. (In Russ.)
26. Koval V.S. Tortsever chipping of lumber and its prevention. *Forestry and horticultural management*, 2012, no. 1, pp. 10–17. (In Ukr.)
27. 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)*. Samosir, Indonesia, 2015. pp. 152–157. DOI: 10.1109/TIME-E.2015.7389765.
28. Diveev A.I., Poltavsky A.V., Alkhatem A. Neuro-fuzzy control of the lumber drying process. *Reliability and quality of complex systems*, 2021, no. 3 (35), pp. 93–97. (In Russ.) DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-12.
29. Turbal E.Yu., Shifrin B.M. Drying lumber based on a fuzzy controller. *State and prospects for the development of the forestry complex in the CIS countries: collection of articles of the II International Scientific and Technical Conference*. Minsk, December 6–9, 2022. Minsk, BSTU Publ., 2022. pp. 160–163. (In Russ.)
30. Turbal E.Yu., Shifrin B.M., Popova D.A. An approach to developing a model for drying lumber based on fuzzy logic. *International Scientific Research Journal*, 2022, no. 7-1 (121), pp. 111–114. (In Russ.)
31. Savchenko D.V., Reznikova K.M., Smyshlyaeva A.A. Fuzzy logic and fuzzy information technologies. *Internet magazine «Waste and Resources»*, 2021, no. 1. (In Russ.) Available at: <https://resources.today/PDF/10ECOR121.pdf> (accessed 17 January 2024).
32. Sanaev V.G., Poleschchuk O.M., Komarov E.G. On the application of fuzzy analysis methods to predict the behavior of wood that has undergone hydrothermal treatment. *Bulletin of the Moscow State Forest University – Forest Bulletin*, 2011, no. 3, pp. 148–156. (In Russ.)
33. Zakarias Situmorang. Fuzzy rule suram for wood drying. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 930, p. 9. DOI: 10.1088/1742-6596/930/1/012043.
34. Wang X.G., Liu W., Gu L., Sun C.J., Gu C.E., de Silva C.W. Development of an intelligent control system for wood drying processes. *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*. Como, Italy, July 08–12, 2001. pp. 371–376. DOI: 10.1109/AIM.2001.936483.
35. Zakarias Situmorang, Husein A.E. Comparison of intelligent fuzzy controller and fuzzy rule suram algorithms in the drying process. *An International Journal Information Sciences Letters*, 2023, vol. 12, no. 6, pp. 2603–2621. DOI: 10.18576/isl/120656.
36. Zhou Z., Zhang P., Huai B., Huang L. System identification of wood drying process based on ARMAX model. *Agricultural Sciences*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 241–248. DOI: 10.4236/as.2019.103020.
37. Vinha Zanuncio A.J., Guimarães Carvalho A., Araújo Júnior C.A., de Assis M.R., da Silva L.F. Neuro-fuzzy hybrid system for monitoring wood moisture content during drying. *Floresta Ambient*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 5. DOI: 10.1590/2179-8087.050417.
38. Li J., Sun L. Forecasting of wood moisture content based on modified ant colony algorithm to optimize LSSVM parameters. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 85116–85127. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991889.
39. Simpson W.T. *Dry kiln operators manual*. WI, U.S. Department of Agriculture, 1991. 273 p.
40. Nguyen V.V. *Method of synthesis of regulators and controller algorithms for a two-channel control system for a lumber drying chamber*. Cand. Dis. Tomsk, 2021. 159 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladislav V. Grechushnikov, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. grechvv@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4827-5906>

Alexander A. Shilin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. shilin@tpu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4761-7249>

Sergey V. Prokhorov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. sergei_prohorov@inbox.ru, <http://orcid.org/0000-0001-9308-4474>

Received: 18.01.2024

Revised: 22.04.2024

Accepted: 26.04.2024