

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131>**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ИК-СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ЗА СЧЕТ АДАПТИВНОСТИ РАБОТЫ САУ**

Научная статья

Левинский В.Н.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-9778-3168;¹ Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (lv_74rus[at]mail.ru)

Аннотация

В работе приводятся описание конструкции, основные технические характеристики и режимы работы инфракрасных сушильных установок на основе пленочных электронагревателей. Для данного типа установок выявлена общая проблема адаптации к эксплуатационным условиям объекта, что приводит к искажению показателей затрат электроэнергии и длительности процесса сушки, заявленных в справочных данных научно-промышленной документации. Рассмотрены основные научные подходы, направленные на повышение эффективности процесса сушки за счет совершенствования алгоритма работы заложенного в систему автоматического управления. На основе вышесказанного, поставлена цель, сформулированы задачи исследования, для реализации которых разработан опытный образец и система автоматического управления, позволяющая получать данные в режиме реального времени и архивировать их для последующего анализа. На разработанной установке проведен эксперимент по сушке сосновой доски толщиной 50 мм, длиной 4 м, с начальной влажностью 58%. Удельные затраты электрической энергии составили 310 кВт·ч на 1 м³ древесины, длительность процесса 139 ч, конечная влажность пиломатериала 14%. Анализ экспериментальных кривых сушки (температуры пиломатериала, температуры и влажности воздуха внутри камеры) показывает, что в первые 24 часа наблюдается активный рост температуры пиломатериала до значений 28-30°C, в последующие 53 часа температура не превышала 35-37°C. Через 77 часов процесс вышел на установленные технологией предельные значения нагрева доски 40°C, контролируемые системой автоматического управления с гистерезисом 1°C. Из полученных результатов следует, что при формировании адаптивной работы системы автоматического управления следует предусмотреть ступенчатый подъем уровня верхней уставки температуры пиломатериала, это поспособствует осуществлению более мягкого режима инфракрасной сушки, позволит получить пиломатериал высокого качества, а также снизить затраты электрической энергии, так как осциллирующий режим работы пленочных электронагревателей позволит увеличить коэффициент полезного их использования в 1,8 раза.

Ключевые слова: сушка, инфракрасный, пиломатериал, система автоматического управления, процесс, температура, влажность.

INCREASE IN THE EFFICIENCY OF IR DRYING OF TIMBER THROUGH ADAPTIVE OPERATION OF ACS

Research article

Levinskiy V.N.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-9778-3168;¹ South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russian Federation

* Corresponding author (lv_74rus[at]mail.ru)

Abstract

The work describes the design, main technical characteristics and operating modes of infrared drying units based on film electric heaters. For this type of installations the general problem of adaptation to operating conditions of the object is identified, which leads to distortion of indicators of power consumption and duration of the drying process, stated in the reference data of scientific and industrial documentation. The main scientific approaches aimed at increasing the efficiency of the drying process by improving the algorithm of work incorporated in the automatic control system are examined. On the basis of the aforementioned, the aim is set, the research tasks are formulated, for the implementation of which a prototype and an automatic control system are developed, allowing to obtain data in real time and archive them for further analysis. The experiment on drying of a pine board 50 mm thick, 4 m long, with initial moisture content of 58% was carried out on the developed unit. Specific electric energy consumption was 310 kWh per 1 m³ of wood, the process duration was 139 h, and the final moisture content of the lumber was 14%. The analysis of experimental drying curves (timber temperature, temperature and humidity of air inside the chamber) shows that in the first 24 hours there is an active growth of timber temperature up to 28-30°C, in the following 53 hours the temperature did not exceed 35-37°C. After 77 hours the process reached the limit values of board heating of 40°C established by the technology, controlled by the automatic control system with 1°C hysteresis. From the received results it follows that at formation of adaptive work of system of automatic control it is necessary to provide a gradual rise of level of the top set point of temperature of timber, it will facilitate implementation of more soft mode of infrared drying, will allow to receive timber of high quality, and also to reduce expenses of electric energy as oscillating mode of work of film electric heaters will allow to increase coefficient of their useful use in 1,8 times.

Keywords: drying, infrared, timber, automatic control system, process, temperature, humidity.

Введение

В раннее опубликованной статье [1] проведен анализ существующих способов сушки древесины, из которых обособленно выделен инфракрасный как наиболее перспективный на сегодняшний день [1], [2]. Это связано с появлением новых низкотемпературных источников тепла, таких как керамические, пленочные электронагреватели [3]. В статье приводится обзор существующих на рынке установок на основе пленочных электронагревателей, их конструктивных особенностей, достоинств и недостатков при эксплуатации [4]. Результатом проведенных исследований стал вывод о том, что для данного типа сушилок отсутствует маршрутная карта технологического процесса, как итог отсутствуют режимы сушки [5]. И для эксплуатации сушилки в производственных реалиях пользователям необходимо адаптировать ее под свои условия (размер камеры, вентиляционная установка). Выявление закономерностей влияния возмущающих факторов на процесс сушки и получения алгоритма создания режима будет способствовать более быстрой адаптации системы автоматического управления при эксплуатации.

Эффективность систем автоматического управления процессом сушки зависит от совершенства алгоритма управления, заложенного в контроллер, управляющий технологическим процессом и от точности регистрации технологических параметров [6], [7]. Алгоритм управления может быть построен на основе математического описания тепло-массообменных процессов сушки [8]. Однако такой подход не находит применения из-за сложности математического аппарата и неопределенности исходных данных для расчета. Другой подход основан на изучении динамических свойств сушильной камеры как объекта управления [9]. В этом случае алгоритм определяется передаточной функцией объекта управления, которая получается экспериментально для конкретной конструкции сушилки и высушиваемого материала. Сложность реализации такого подхода состоит в том, что сушильная камера состоит из нескольких зон, обладающих различными передаточными функциями [9]. Еще один подход к созданию алгоритма управления основан на использовании экспериментально полученной модели сушки от технологических параметров процесса [7], [10], [11].

В связи с вышесказанным, целью настоящей статьи является повышение эффективности процесса инфракрасной сушки древесины в установках на основе пленочных электронагревателей за счет адаптивной работы системы автоматического управления.

Задачи исследования:

1. Разработать и создать опытный образец сушильной установки на основе пленочных электронагревателей;
2. Разработать и создать систему автоматического управления установки с обязательным архивированием получаемых данных температуры и влажности на протяжении всего процесса сушки пиломатериалов;
3. Экспериментально получить кривые сушки пиломатериала, произвести их анализ, на основе которого предложить пути повышения эффективности за счет изменения технологических параметров в процессе сушки.

Материалы и принципы исследования

На базе ФГБОУ ВО «Южноуральский Уральский ГАУ» разработан и создан опытный образец сушильной установки древесины (рис. 1). Размер камеры обусловлен справочными данными научно-промышленной документации, в которой рекомендовано: соотношение единицы загруженного пиломатериала к пяти единицам свободного объема камеры (1:5); соотношение трехкратного обмена воздуха для выбранного объема камеры, это важно при выборе вытяжного вентилятора; соотношение установленной мощности пленочных электронагревателей к объему высушиваемого пиломатериала – 3,5 кВт на 1 м³ [12], [13]. В таблице 1 приведены технические характеристики опытного образца с учетом приведенных соотношений.

Таблица 1 - Технические характеристики опытного образца сушильной установки

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131.1>

№	Наименование параметра	Кол-во
1	Объем камеры, м ³	20
2	Максимальный объем загрузки древесины, м ³	4
3	Количество щитов, шт	10
4	Размер щита, м	1,4x2,0
5	Установленная мощность 1 щита, кВт	1



Рисунок 1 - Внешний вид опытного образца сушильной установки
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131.2>

Запатентованный способ сушки заключается в следующем [14]: укладывается штабель, который состоит из нескольких слоев досок с разделительными рейками, укладываемые поперек. Между слоями (не менее двух слоев) размещают сбитый щит с пленочными электронагревателями, перекрывающими всю поперечную площадь штабеля. В основании штабеля и наверху устанавливаются щиты с отражателями для направления теплового потока внутрь. Далее пленочные электронагреватели посредством разъемов подключают к сети питания. В этот момент ток начинает протекать по резистивному проводнику и нагревает его, далее это тепло распространяется по фольге, тем самым образуя излучающую поверхность, которая с определенной плотностью потока излучения воздействует на пиломатериал, происходит постепенный прогрев, провоцируя тем самым процесс сушки.

Процесс сушки происходит циклично в зависимости от температуры нагревая доски, которая фиксируется по датчику, установленному непосредственно в ней в предварительно-просверленном отверстии. Температуру нагрева рекомендовано выставлять по двум уставкам: верхняя (40-45°C) и нижняя (35-38°C). То есть, пока температура датчика, установленного в доске, не достигнет уровня, к примеру, 40°C, пленочные электронагреватели будут находиться во включенном состоянии. При ее достижении пленочные электронагреватели будут отключены, пока температура датчика не станет равной нижней уставки, к примеру 35°C. Далее процесс включения и отключения электронагревателей повторяется до заданных значений датчика влажности и температуры, установленных непосредственно в камере.

Работа вентиляционной камеры осуществляется по тому же принципу верхней (85-90%) и нижней уставки (60-65%), по которым регулируются работа вентилятора вытяжного. Процесс сушки заканчивается в соответствии с установленным значением относительной влажности камеры [15], что, согласно таблице, соответствует влажности древесины определенной породы [16].

Именно этот алгоритм работы был организован в опытном образце (рис. 1), функциональная схема системы автоматического управления (САУ) приведена на рисунке 2.

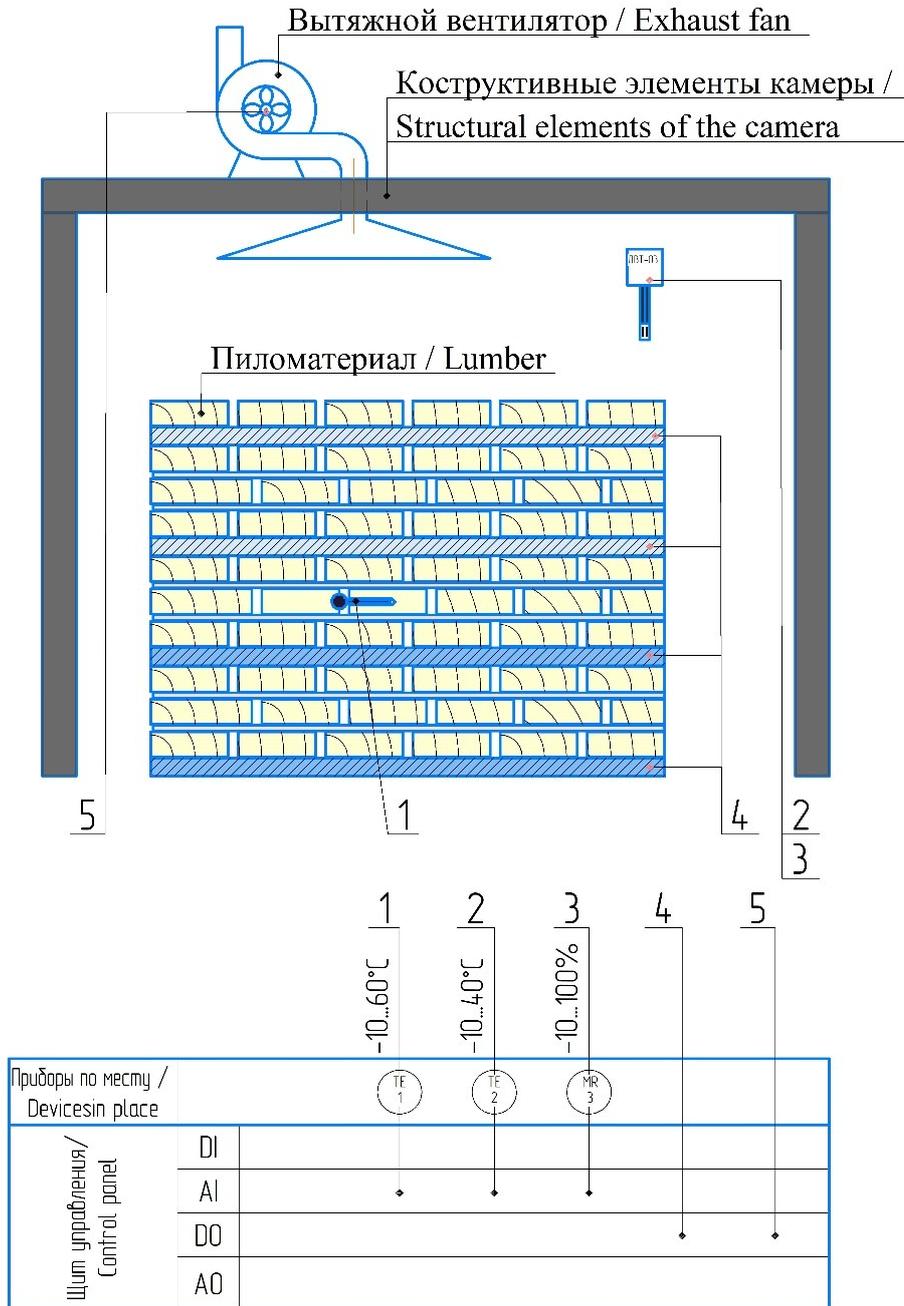


Рисунок 2 - Функциональная схема системы автоматического управления сушильной установки
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131.3>

Из рисунка 2 следует, что система автоматического управления должна предусматривать контроллер температуры и влажности, в котором минимальное количество входов аналоговых – 3; дискретных выходов – 2.

Для реализации управления процессом предусмотрен универсальный измеритель температуры и влажности ТРМ-138 с 8-ю универсальными настраиваемыми входами и с 8-ю релейными выходами [17]. Такое количество входов и выходов объясняется планом экспериментов, который подразумевает исследование динамики изменения температуры в разных точках штабеля, что позволит в дальнейшем оптимизировать режимы сушки [18], либо усовершенствовать САУ для разделения электрической нагрузки по группам, что решает вопрос оптимизации процесса [19]. К ТРМ-138 посредством адаптера АС-4 предусмотрено подключение к персональному компьютеру (ПК), на который предварительно было установлено программное обеспечение Owen Process Manager (OPM) (рис. 3), предназначенного для записи всего процесса сушки и последующего его анализа с построением графиков непосредственно в самой программе, либо перевода данных в формат документа «excel» [20]. Полученные экспериментальные кривые сушки позволят дать оценку сходимости с теоретическими (рис. 4) [21], определить первый и второй период падающей скорости [22], а также выявить закономерности влияния возмущающих факторов на процесс сушки и совершенствования режима работы данного типа установок.

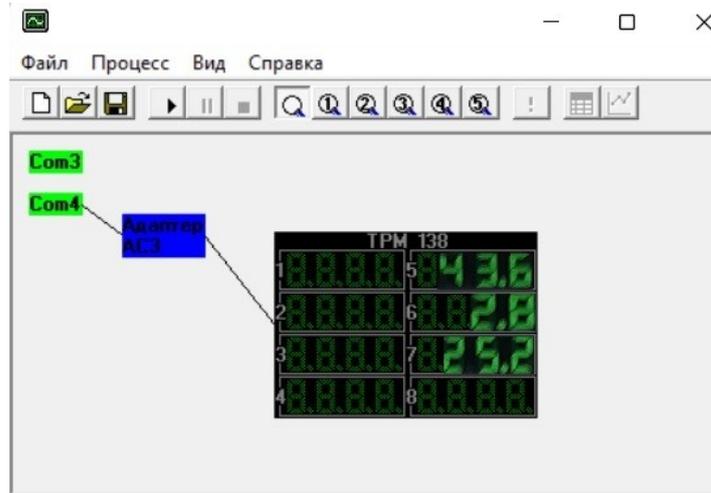


Рисунок 3 - Диалоговое окно программного обеспечения Owen Process Manager (OPM)
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131.4>

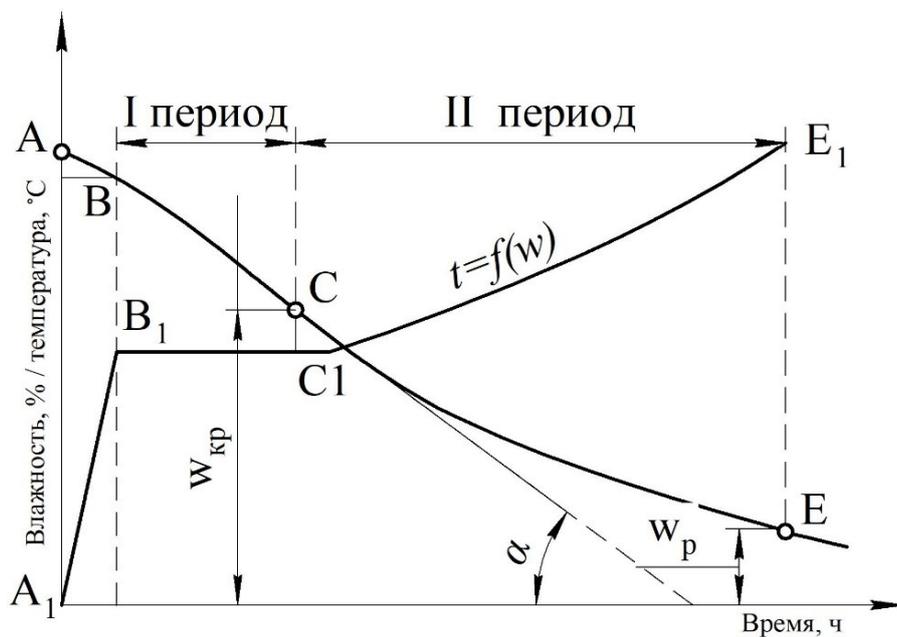


Рисунок 4 - Кривая сушки, описывающая процесс обезвоживания продукт
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131.5>

Окончательный набор оборудования для организации САУ опытного образца сушильной установки приведен в таблице 2, а на рисунке 5 схема электрическая принципиальная (силового оборудования).

Таблица 2 - Набор оборудования для САУ сушильной установки

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131.6>

№	Поз. на схеме рис.2	Наименование оборудования	Кол-во
1		Измеритель-регулятор ТРМ-138	1
2	1	Датчик температуры ДТС014-50М.В3.20/5	1
3	2,3	Датчик температуры и влажности ДВТ-03.ТЭ.2.Н1.80	1
4		Преобразователь	1

		интерфейсов AC-4 RS-485<->USB	
5	4	Щит с пленочными электронагревателями ($P_{уд}=380 \text{ Вт/м}^2$)	10
6	5	Вытяжной вентилятор (0,12 кВт; 1500 об/мин; 0,38-0,88 м ³ /ч) ВЦ 4-70(М)-2,5	1

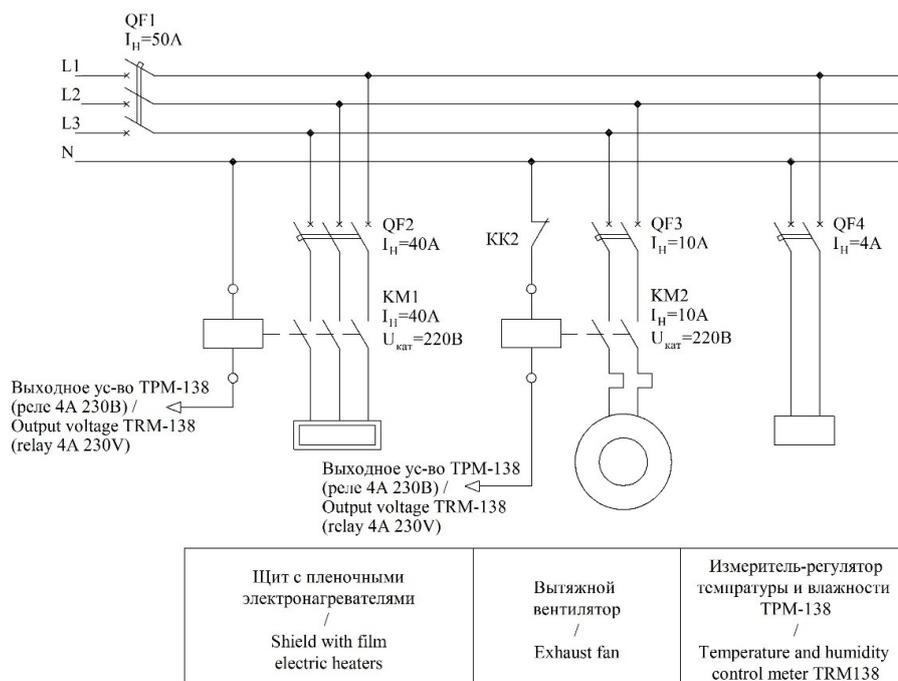


Рисунок 5 - Схема электрическая принципиальная силового оборудования сушильной установки
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131.7>

Обсуждение и основные результаты

После монтажа всех основных узлов сушильной установки был произведен запуск и длительный процесс работы на холостом ходу (72 часа). Далее была выполнена загрузка пиломатериала и его высушивание с контролем и архивированием параметров температуры и влажности в течении всего процесса сушки по описанному алгоритму управления выше.

На рисунке 6 показаны графики процесса сушки пиломатериала [23], который длился 139 часов (5 суток и 19 часов). В камеру была загружена сосна: толщина доски – 50 мм; длина – 4 м; начальная влажность – 58%, количество – 3 м³. Влажность доски составила 14%, удельные затраты электрической энергии на высушивание одного кубического метра составили 310 кВт·ч. В процессе сушки измерение влажности производилось косвенным способом по влагосодержанию в камере. Абсолютная величина влажности пиломатериала измерялась с применением игольчатого влагомера до начала процесса сушки и после.

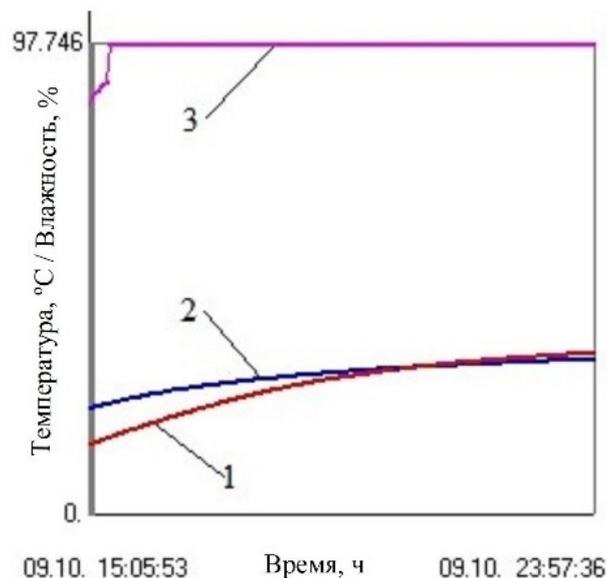


Рисунок 6 - Процесс сушки пиломатериала записанного с применением ПО ОРМ
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.131.8>

Примечание: 1 – температура пиломатериала; 2 – температура воздуха внутри камеры; 3 – влажность воздуха внутри камеры

Верхняя уставка температуры пиломатериала устанавливалась на уровне 40°C, гистерезис 1°C, для влажности воздуха в камере 85%, гистерезис 15% данные показатели не менялись на всем протяжении процесса сушки. Как следует из полученных графиков (рис. 5), на заданный режим САУ вышла только через 77 часов, то есть на всем протяжении этого времени (55% от всего времени процесса сушки) все пленочные электронагреватели сушильной установки были в работе. Кривая влажности (3) в течение 72 часов была 97-98%, что говорит о постоянной работе вентилятора в течении этого времени, при этом в самой камере на стенках и на потолке наблюдался конденсат.

В начале процесса кривая (2) была выше (1), это объясняется тем, что пиломатериал был загружен в камеру с улицы. Затем кривые (1) и (2) сравнялись и имели одинаковые значения в пределах 29-31°C, что говорит о прогреве пиломатериала [24]. Далее кривая (1) стала выше (2), и начался постепенный рост до заданного значения верхней уставки – 40°C, характеризующийся активным выходом свободной влаги из пиломатериала [25].

После выхода на заданные системой автоматического управления показатели, кривые характеризуют процесс сушки, как осциллирующий [26]. Влажность воздуха внутри камеры постепенно снижается, что говорит о менее интенсивном выходе влаги из древесины и чем ближе окончание процесса, тем больше разница значений между кривыми (1) и (2) [26].

Заключение

Полученные кривые процесса сушки пиломатериалов, полностью соответствуют теоретическим (рис. 4). Однако ввиду активного испарения в первый период падающей скорости задание, что делает невозможным выход на заданный уровень верхней уставки, с целью повышения энергетической эффективности, в алгоритме работы системы автоматического управления следует предусмотреть ступенчатый подъем уровня верхней уставки температуры пиломатериала. Это позволит осуществлять более мягкий режим сушки [27], и за счет непостоянной работы пленочных электронагревателей в первые дни, процесс сушки будет с более низким уровнем энергозатрат [28].

Анализ процесса сушки пиломатериала (рис. 6) показывает: в первые сутки заметен активный рост значений температура пиломатериала до отметки в пределах 28-30°C; во вторые и третьи сутки температура пиломатериала находилась в пределах 35-37°C; на четвертые сутки температура пиломатериала достигла верхней уставки 40°C и с учетом гистерезиса находилась в пределах 39-41°C.

Исходя из этого, прослеживается три ступени подъема температуры, которые необходимо выдерживать определенный промежуток времени и если предусмотреть это в системе автоматического управления инфракрасной сушки пиломатериала в установках на основе пленочных электронагревателей, то это позволит повысить их эффективность.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российской научный фонд (Открытый конкурс «Проведение инициативных исследований молодыми учеными». № Соглашение 23-76-01090.)

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was supported by Russian Science Foundation (open competition "Initiative Research by Young Scientists")

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Попов В.М. К вопросу об инфракрасной сушке древесины / В.М. Попов, В.Н. Левинский, В.А. Афонькина // *Материалы Международной научно-практической конференции Института агроинженерии «Современные тенденции агроинженерных наук и инновационные технологии в сельском хозяйстве»*. — Челябинск, 2021. — С. 242-251
2. Levinskiy V.N. Comparative Experiment on the Use of a Film Electric Heater for Drying Wood in Vacuum Conditions / V.N. Levinskiy // *BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023)*. — Les Ulis, 2024. — P. 05025.
3. Счисленко Д.М. Повышение эффективности ИК-сушки плодов рябины черноплодной путем исследования их спектральных характеристик / Д.М. Счисленко, А.В. Бастрон // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. — №5(187). — 2020. — С. 159-165.
4. Попов В.М. Математическая модель для обоснования параметров пленочного электронагревателя на основе высокоомной проволоки / В.М. Попов, Е.Н. Епишков, В.А. Афонькина [и др.] // *АПК России*. — Т.27. — №2. — 2020. — С. 346-350.
5. Попов В.М. Проблемы проектирования инфракрасных установок для высоковлажного сырья / В.М. Попов, В.А. Афонькина, В.Н. Левинский // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. — №3(47). — 2018. — С. 84-88.
6. Афонькина В.А. К вопросу управления процессом комбинированной сушки зерна / В.А. Афонькина, В.Г. Захахатнов, В.И. Майоров [и др.] // *Вестник Мордовского университета*. — Т. 26. № 1. — 2016. — С. 32-33.
7. Манасян С.К. Моделирование и оптимизация процессов сушки зерна / С.К. Манасян, Н.В. Демский, Т.А. Лулева [и др.] // *Вестник КрасГАУ*. — 2010. — №12(51). — С. 128-133.
8. Гороховский А.Г. Моделирование процесса сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, В.В. Побединский, Е.Е. Шишкина [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. — №1(373). — 2020. — С. 154-166.
9. Андрианов Н.М. Идентификация шахтной зерносушилки в условиях нормальной работы / Н.М. Андрианов, Ш. Мэй, Ю. Сюе // *Фундаментальные исследования*. — №2-16. — 2015. — С. 3459 – 3465.
10. Захахатнов В.Г. Планирование эксперимента по исследованию времени сушки зерна в шахтной сушилке / В.Г. Захахатнов, П.В. Кашин, Г.Д. Коковин // *АПК России*. — Т. 25. — №3. — 2018. — С. 400-404.
11. Захахатнов В.Г. Определение начальной влажности зерна при сушке по времени его нагрева / В.Г. Захахатнов, П.В. Кашин // *Вестник ВИЭСХ*. — №1(30). — 2018. — С. 33-37.
12. Пат. 2514576 Российская Федерация, МПК F26B 3/34 Способ сушки древесины / В.М. Попов, В.А. Афонькина, Е.И. Шукшина.
13. Пат. 2367861 Российская Федерация, Способ сушки древесины / Н.Е. Епишков, Е.Н. Епишков, С.В. Глухов [и др.]
14. Левинский В.Н. К вопросу об ИК-сушке массивных спилов из ценных пород древесины / В.Н. Левинский, М.В. Филатов // *Научно-технический вестник: Технические системы в АПК*. — №2(18). — 2023. — С. 20-26.
15. Зарипов Ш.Г. Влияние технологии сушки листовых пиломатериалов на длительность процесса обезвоживания / Ш.Г. Зарипов, В.А. Корниенко // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. — 2020. — №4(376). — С. 134-146.
16. Лоскутов С.Р. Гигроскопические свойства древесины листовых пород / С.Р. Лоскутов, О.А. Шапченкова, А.А. Анискина // *Лесной вестник*. — Т. 26. — №2. — 2022. — С. 92-102.
17. Левинский В.Н. Система автоматического управления инфракрасной сушильной установки высоковлажного биологического сырья цилиндрического типа / В.Н. Левинский, В.М. Попов, В.А. Афонькина // *Материалы международной научно-практической конференции «Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития» // Ответственные за выпуск: В.Л. Бопп, Е.И. Сорокатая*. — 2018. — С. 121-125
18. Поляков С.И. Совершенствование автоматизированного управления роликовой сушилкой для сушки шпона / С.И. Поляков, В.О. Лубков // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. — Т.6. — №4(40). — 2018. — С. 361-366.
19. Дунаев А.М. Автоматизированная система научных исследований технологического процесса сушки древесины / А.М. Дунаев, М.П. Дунаев // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. — Т. 23. — №3(146). — 2019. — С. 443-450.

20. Мизонов В.Е. Теоретическое исследование нелинейной теплопроводности в многослойной среде с фазовыми переходами в слоях / В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, Е.В. Басова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — №1. — 2020. — С. 53-59.
21. Рудобашта С.П. ИК-сушка пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов, Г.А. Зуева // Инженерно-физический журнал. — Т. 95. — №2. — 2022. — С. 364-372.
22. Аипов Р.С. Математическая модель процесса сушки пиломатериалов при дискретном расположении источников СВЧ-энергии / Р.С. Аипов, М.И. Тухватуллин, Р.Б. Яруллин [и др.] // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. — № 2(50). — 2019. — С. 82-88.
23. Деянов Д.И. Импульсная сушка заготовок из древесины ироко, мербау и венге в конвективной сушильной камере / Д.И. Деянов, А.А. Косарин, С.А. Моисеев [и др.] // Лесной вестник. — Т. 27. — №3. — 2023. — С. 143-149. — DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-143-149
24. Моисеев С.А. Импульсная сушка заготовок из древесины красного и черного дерева в конвективных сушильных камерах / С.А. Моисеев, Д.И. Деянов, А.А. Косарин [и др.] // Лесной вестник. — Т. 26. — №5. — 2022. — С. 112-119. — DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-112-119
25. Деянов Д.И. Импульсная сушка пиломатериалов из древесины грецкого и американского черного ореха в конвективных сушильных камерах / Д.И. Деянов, С.А. Моисеев, А.А. Косарин [и др.] // Лесной вестник. — Т. 26. — №2. — 2022. — С. 85-91. — DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-85-91
26. Колобаева А.А. Исследование кинетики сушки растительного сырья / А.А. Колобаева, О.А. Котик, Е.В. Панина [и др.] // Технология и товароведение сельскохозяйственной продукции. — №2(17). — 2021. — С. 154-160
27. Рудобашта С.П. Расчет кинетики сушки пластины с учетом ее усадки / С.П. Рудобашта, О.Р. Дорняк, В.М. Дмитриев // Теоретические основы химической технологии. — Т. 55. — №5. — 2021. — С. 612-617.
28. Rudobashta S.P. Modeling of the Deep Drying Process of Granulated Polyamide at Convective-infrared Energy Supply / S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, V.A. Zaytsev // ChemChemTech. — V. 62. — №12. — 2019. — P. 94-100.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Popov V.M. K voprosu ob infrakrasnoj sushke drevesiny [On the Issue of Infrared Drying of Wood] / V.M. Popov, V.N. Levinskij, V.A. Afon'kina // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii Instituta agroinzhenerii «Sovremennye tendencii agroinzhenernyh nauk i innovacionnye tekhnologii v sel'skom hozyajstve» [Materials of the International Scientific and Practical Conference of the Institute of Agroengineering "Modern Trends in Agroengineering Sciences and Innovative Technologies in Agriculture"]. — Chelyabinsk, 2021. — P. 242-251 [in Russian]
2. Levinskij V.N. Comparative Experiment on the Use of a Film Electric Heater for Drying Wood in Vacuum Conditions / V.N. Levinskij // BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023). — Les Ulis, 2024. — P. 05025.
3. Schislenko D.M. Povyshenie effektivnosti IK-sushki plodov ryabiny chernoplodnoj putem issledovaniya ih spektral'nyh harakteristik [Improving the Efficiency of IR Drying of Mountain Ash Fruits by Studying Their Spectral Characteristics] / D.M. Schislenko, A.V. Bastron // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Altai State Agrarian University]. — №5(187). — 2020. — P. 159-165 [in Russian].
4. Popov V.M. Matematicheskaya model' dlya obosnovaniya parametrov plenochnogo elektronagrevatelya na osnove vysokoomnoj provoloki [Mathematical Model to Substantiate the Parameters of a Film Electric Heater Based on High Resistance Wire] / V.M. Popov, E.N. Epishkov, V.A. Afon'kina [et al.] // APK Rossii [AIC of Russia]. — V. 27. — №2. — 2020. — P. 346-350 [in Russian].
5. Popov V.M. Problemy proektirovaniya infrakrasnyh ustanovok dlya vysokovlazhnogo syr'ya [Problems of Designing Infrared Installations for High-moisture Raw Materials] / V.M. Popov, V.A. Afon'kina, V.N. Levinskij // Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University]. — №3(47). — 2018. — P. 84-88 [in Russian].
6. Afon'kina V.A. K voprosu upravleniya processom kombinirovannoj sushki zerna [On the Issue of Managing the Combined Grain Drying Process] / V.A. Afon'kina, V.G. Zahahatnov, V.I. Majorov [et al.] // Vestnik Mordovskogo universiteta [Bulletin of the Mordovian University]. — V. 26. № 1. — 2016. — P. 32-33 [in Russian].
7. Manasyan S.K. Modelirovanie i optimizaciya processov sushki zerna [Modeling and Optimization of Grain Drying Processes] / S.K. Manasyan, N.V. Demskij, T.A. Luneva [et al.] // Vestnik KrasGAU [Bulletin of KrasSAU]. — 2010. — №12(51). — P. 128-133 [in Russian].
8. Gorohovskij A.G. Modelirovanie processa sushki pilomaterialov [Modeling of the Lumber Drying Process] / A.G. Gorohovskij, V.V. Pobedinskij, E.E. Shishkina [et al.] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of Higher Educational Institutions. Forest Magazine]. — №1(373). — 2020. — P. 154-166 [in Russian].
9. Andrianov N.M. Identifikaciya shahtnoj zernosushilki v usloviyah normal'noj raboty [Identification of a Mine Grain Dryer under Normal Operating Conditions] / N.M. Andrianov, SH. Mej, YU. Syue // Fundamental'nye issledovaniya [Basic Research]. — №2-16. — 2015. — P. 3459 – 3465 [in Russian].
10. Zahahatnov V.G. Planirovanie eksperimenta po issledovaniyu vremeni sushki zerna v shahtnoj sushilke [Planning an Experiment to Study the Drying Time of Grain in a Mine Dryer] / V.G. Zahahatnov, P.V. Kashin, G.D. Kokovin // APK Rossii [AIC of Russia]. — V. 25. — №3. — 2018. — P. 400-404 [in Russian].
11. Zahahatnov V.G. Opredelenie nachal'noj vlazhnosti zerna pri sushke po vremeni ego nagreva [Determination of the Initial Moisture Content of Grain during Drying by the Time of Its Heating] / V.G. Zahahatnov, P.V. Kashin // Vestnik VIESKH [Bulletin of VIESKH]. — №1(30). — 2018. — P. 33-37 [in Russian].

12. Pat. 2514576 Rossijskaya Federaciya, MPK F26V 3/34 Sposob sushki drevesiny [Pat. 2514576 Russian Federation, IPC F26V 3/34 Method of drying wood] / V.M. Popov, V.A. Afon'kina, E.I. SHukshina [in Russian].
13. Pat. 2367861 Rossijskaya Federaciya, Sposob sushki drevesiny [Pat. 2367861 Russian Federation, Wood drying method] / N.E. Epishkov, E.N. Epishkov, S.V. Gluhov [et al.] [in Russian]
14. Levinskij V.N. K voprosu ob IK-sushke massivnyh spilov iz cennyh porod drevesiny [On the Issue of IR Drying of Massive Cuts from Valuable Wood Species] / V.N. Levinskij, M.V. Filatov // Nauchno-tehnicheskij vestnik: Tekhnicheskie sistemy v APK [Scientific and Technical Bulletin: Technical Systems in Agriculture]. — №2(18). — 2023. — P. 20-26 [in Russian].
15. Zariipov SH.G. Vliyanie tekhnologii sushki listvennichnyh pilomaterialov na dlitel'nost' processa obezvozhivaniya [The Effect of Larch Lumber Drying Technology on the Duration of the Dehydration Process] / SH.G. Zariipov, V.A. Kornienko // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal [News of Higher Educational Institutions. Forest Magazine]. — 2020. — №4(376). — P. 134-146 [in Russian].
16. Loskutov S.R. Gigroskopicheskie svoystva drevesiny listvennyh porod [Hygroscopic Properties of Hardwood] / S.R. Loskutov, O.A. SHapchenkova, A.A. Aniskina // Lesnoj vestnik [Forest Bulletin]. — V. 26. — №2. — 2022. — P. 92-102 [in Russian].
17. Levinskij V.N. Sistema avtomaticheskogo upravleniya infrakarsnoj sushil'noj ustanovki vysokovlazhnogo biologicheskogo syr'ya cilindricheskogo tipa [Automatic Control Systems for the Infrared Drying Unit of High-moisture Biological Cheese of Cylindrical Type] / V.N. Levinskij, V.M. Popov, V.A. Afon'kina // Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauka i obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy razvitiya» [Materials of the International Scientific and Practical Conference "Science and Education: Experience, Problems, Development Prospects"] // Responsible for the release: V.L. Bopp, E.I. Sorokataya. — 2018. — P. 121-125 [in Russian]
18. Polyakov S.I. Sovershenstvovanie avtomatizirovannogo upravleniya rolikovoj sushilkoj dlya sushki shpona [Improvement of the Automated Control of the Roller Dryer for Drying Veneer] / S.I. Polyakov, V.O. Lubkov // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika [Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice]. — V. 6. — №4(40). — 2018. — P. 361-366 [in Russian].
19. Dunaev A.M. Avtomatizirovannaya sistema nauchnyh issledovanij tekhnologicheskogo processa sushki drevesiny [Automated System for Scientific Research of the Technological Process of Wood Drying] / A.M. Dunaev, M.P. Dunaev // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]. — V. 23. — №3(146). — 2019. — P. 443-450 [in Russian].
20. Mizonov V.E. Teoreticheskoe issledovanie nelinejnoj teploprovodnosti v mnogoslojnoj srede s fazovymi perekhodami v sloyah [Theoretical Study of Nonlinear Thermal Conductivity in a Multilayer Medium with Phase Transitions in Layers] / V.E. Mizonov, A.V. Mitrofanov, E.V. Basova // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Bulletin of the Ivanovo State Energy University]. — №1. — 2020. — P. 53-59 [in Russian].
21. Rudobashta S.P. IK-sushka plastiny v nepreryvno dejstvuyushchem elektromagnitnom pole [IR Drying of the Plate in a Continuously Operating Electromagnetic Field] / S.P. Rudobashta, E.M. Kartashov, G.A. Zueva // Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Engineering and Physics Journal]. — V. 95. — №2. — 2022. — P. 364-372 [in Russian].
22. Aipov R.S. Matematicheskaya model' processa sushki pilomaterialov pri diskretnom raspolozhenii istochnikov SVCH-energii [A Mathematical Model of the Drying Process of Lumber with a Discrete Arrangement of Microwave Energy Sources] / R.S. Aipov, M.I. Tuhvatullin, R.B. YArullin [et al.] // Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University]. — № 2(50). — 2019. — P. 82-88 [in Russian].
23. Deyanov D.I. Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny iroko, merbau i venge v konvektivnoj sushil'noj kamere [Pulse Drying of Iroko, Merbau and Wenge Wood Blanks in a Convective Drying Chamber] / D.I. Deyanov, A.A. Kosarin, S.A. Moiseev [et al.] // Lesnoj vestnik [Forest Bulletin]. — V. 27. — №3. — 2023. — P. 143-149. — DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-143-149 [in Russian]
24. Moiseev S.A. Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny krasnogo i chernogo dereva v konvektivnyh sushil'nyh kamerah [Pulse Drying of Red and Ebony Wood Blanks in Convective Drying Chambers] / S.A. Moiseev, D.I. Deyanov, A.A. Kosarin [et al.] // Lesnoj vestnik [Forest Bulletin]. — V. 26. — №5. — 2022. — P. 112-119. — DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-112-119 [in Russian]
25. Deyanov D.I. Impul'snaya sushka pilomaterialov iz drevesiny greckogo i amerikanskogo chernogo orekha v konvektivnyh sushil'nyh kamerah [Pulse Drying of Sawn Timber from the Greek and American Black Lake in Convective Drying Chambers] / D.I. Deyanov, S.A. Moiseev, A.A. Kosarin [et al.] // Lesnoj vestnik [Forest Bulletin]. — V. 26. — №2. — 2022. — P. 85-91. — DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-85-91 [in Russian]
26. Kolobaeva A.A. Issledovanie kinetiki sushki rastitel'nogo syr'ya [Investigation of the Kinetics of Drying Vegetable Raw Materials] / A.A. Kolobaeva, O.A. Kotik, E.V. Panina [et al.] // Tekhnologiya i tovarovedenie sel'skohozyajstvennoj produkcii [Technology and Commodity Science of Agricultural Products]. — №2(17). — 2021. — P. 154-160 [in Russian]
27. Rudobashta S.P. Raschet kinetiki sushki plastiny s uchetom ee usadki [Calculation of the Kinetics of Plate Drying, Taking into Account Its Shrinkage] / S.P. Rudobashta, O.R. Dorniyak, V.M. Dmitriev // Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii [Theoretical Foundations of Chemical Technology]. — V. 55. — №5. — 2021. — P. 612-617 [in Russian].
28. Rudobashta S.P. Modeling of the Deep Drying Process of Granulated Polyamide at Convective-infrared Energy Sub-supply / S.P. Rudobashta, G.A. Zueva, V.A. Zaytsev // ChemChemTech. — V. 62. — №12. — 2019. — P. 94-100.