

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ В УСТАНОВКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

В.Н. Левинский✉, С.И. Уразов, В.А. Афонькина

ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», Россия, 457103, Челябинская обл., г. Троицк, ул. им. Ю.А. Гагарина, д. 13

Lv_74rus@mail.ru

Приведен анализ проблематики создания систем автоматического управления для набирающих популярность сушильных установок на основе низкотемпературных инфракрасных генераторов. Описаны методы и средства получения математической модели инфракрасной сушки древесины с применением пленочных электронагревателей, разработанных учеными Института агроинженерии ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ» г. Челябинск. Приведено описание экспериментальной сушильной установки и системы автоматического управления процессом сушки с функцией архивирования всех показателей технологических параметров необходимых для получения динамических кривых температуры и влажности. С помощью метода корреляционно-регрессионного анализа установлена связь между параметрами технологического процесса сушки соснового пиломатериала. Проведены натуральные эксперименты по низкотемпературной сушке сосновых досок, уложенных в штабеле, по результатам которых определено соответствие полученных температурно- и влажностно-временных зависимостей с кинетическими кривыми известной теории сушки. Выполнен развернутый регрессионный анализ по полученному массиву данных основных параметров сушки (время, температура и влажность воздуха в камере, температура древесины). Доказано эффективное дробление кривой кинетики сушки на три поддиапазона, характеризующихся собственными параметрами теплодинамики, математические модели которых стали основой алгоритмов интеллектуальной системы автоматического управления. Разработаны практические рекомендации по организации инфракрасной сушки пиломатериалов, созданию и регулировке систем автоматического контроля. По динамическим характеристикам сушилки как результату новых знаний можно через передаточные функции САУ определить тип и настройки регуляторов. Подтверждена гипотеза о том, что окончание массообменных процессов с переходом работы установки в квазистационарный тепловой режим происходит до окончания фактического периода сушки.

Ключевые слова: ИК-сушка, древесина, математическая модель, регрессионный анализ, пленочный электронагреватель

Ссылка для цитирования: Левинский В.Н., Уразов С.И., Афонькина В.А. Регрессионный анализ процесса инфракрасной сушки древесины в установке с применением пленочных электронагревателей // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 126–143.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-126-143

Известно, что 90...95 % пиломатериалов на сегодняшний день высушивается в конвективных камерах [1–6]. Благодаря популярности данных установок для них существенно проработаны методики расчетов конструктивных, технологических и режимных параметров, соответственно, и система автоматического управления процессом сушки так же достаточно проработана. Система управления с высокой точностью позволяет управлять режимом сушки по влажности воздуха, времени, температуре и температурному перепаду в штабеле. Этого нельзя сказать о менее популярных, но весьма перспективных с точки зрения мобиль-

ности, энергоэффективности (при сравнении с электрическими установками), доступности по цене для любого потребителя, экологичности, простоты эксплуатации и выхода качественного сухопродукта сушильных установках на основе низкотемпературных пленочных электронагревателей (рис. 1) [7, 8].

Эффективность систем автоматического управления процессом сушки зависит от совершенства алгоритма управления, заложенного в контроллер, управляющий технологическим процессом и от точности регистрации технологических параметров [9, 10]. Алгоритм управления может быть построен на основе математического описания тепло- массообменных процессов сушки [11–13]. Однако такой подход не находит применения вследствие сложности



Рис. 1. Сушильная установка на основе низкотемпературных пленочных электронагревателей

Fig. 1. Drying plant based on low-temperature film electric heaters

математического аппарата и неопределенности исходных данных для расчета.

Другой подход основан на изучении динамических свойств сушильной камеры как объекта управления. В этом случае алгоритм определяется передаточной функцией объекта управления, которая получается экспериментально для конкретной конструкции сушилки и высушиваемого материала. Сложность реализации такого подхода заключается в том, что сушильная камера состоит из нескольких зон, обладающих различными передаточными функциями [14, 15]. Еще один подход к созданию алгоритма управления основан на использовании экспериментально полученной модели сушки от технологических параметров процесса [16–18].

Цель работы

Цель работы — получение математической модели процесса сушки древесины в установке на основе пленочных электронагревателей.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились на экспериментальной сушильной установке с набором конкретных характеристик (табл. 1).

Набор оборудования сушильной установки для реализации управления процессом сушки древесины включал в себя универсальный измеритель-регулятор температуры и влажности ТРМ-138 (1 шт.), датчик температуры ДТС014-

Т а б л и ц а 1

**Технические характеристики
экспериментальной сушильной установки**
Technical characteristics
of the experimental drying plant

Наименование параметра	Количество
Объем камеры, м ³	20
Максимальный объем загрузки древесины, м ³	4
Количество щитов с пленочными электронагревателями, шт.	10
Размер щита, м	1,4×2,0
Установленная мощность одного щита, кВт	1
Вытяжной вентилятор ВЦ 4-70(М)-2,5 с параметрами: 0,12 кВт; 1500 об./мин; 0,38...0,88 м ³ /ч	1

50М.В3.20/5 (1 шт.), датчик температуры и влажности ДВТ-03.ТЭ.2.Н1.80 (1 шт.), преобразователь интерфейсов АС-4 RS-485<->USB (1 шт.).

Вначале укладывался штабель, который представлял собой несколько слоев досок с разделительными рейками, укладываемыми поперек (рис. 2). Между слоями (не менее двух слоев) размещали сбитый щит с пленочными электронагревателями [19, 20], перекрывающими всю поперечную площадь штабеля. В основании штабеля и наверху устанавливали щиты с отражателями для направления теплового потока внутрь. Далее пленочные электронагреватели посредством разъемов подключались к сети питания [7, 8, 21, 22].

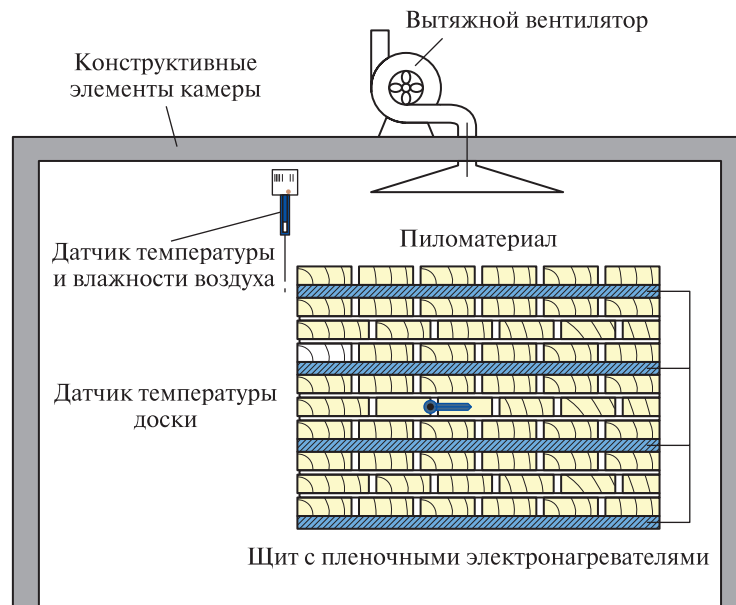


Рис. 2. Схема расположения технологического оборудования и первичных измерительных преобразователей
Fig. 2. Layout of technological equipment and primary measuring transducers

Т а б л и ц а 2

Экспериментальные показатели сушки сосны
Experimental indicators of pine drying

Номер п/п	Объем загрузки, м ³	Влажность, %		Время процесса сушки, ч	Удельные затраты электрической энергии, кВт·ч/м ³
		начальная	конечная		
1	3,0	58	14	139	310
2	2,2	59	12	166	390
3	3,0	66	16	187	390
4	3,5	65	16	152	330
5	3,8	56	14	170	330

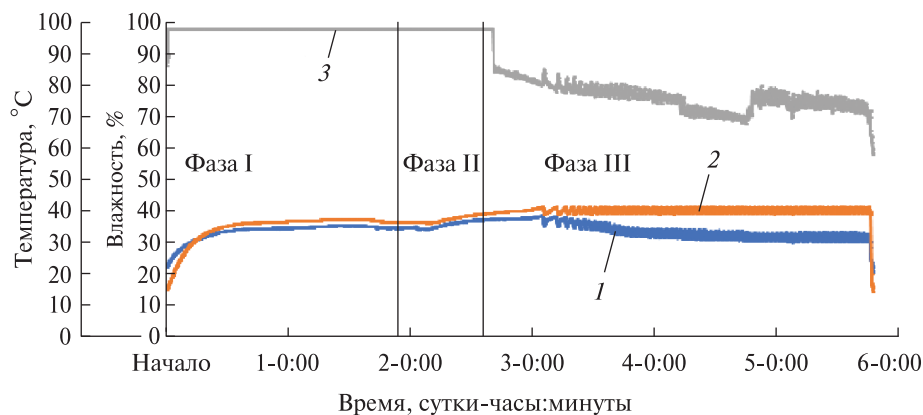


Рис. 3. Кривые сушки древесины согласно эксперименту № 1 из табл. 3: 1 — температура сушильного агента; 2 — температура древесины; 3 — влажность сушильного агента
Fig. 3. Drying curves of wood according to experiment No. 1 from Table 3: 1 — temperature of the drying agent; 2 — temperature of wood; 3 — humidity of the drying agent

Корреляционная матрица по первичному набору данных
Correlation matrix for the primary data set

$n = 2775$ $t_{кр}(5\%, 2773) = 1,96$	Температура сушильного агента	Температура древесины	Влажность сушильного агента
Температура сушильного агента	–	$r = 0,4927$ (умеренная)	$r = 0,2584$ (слабая)
Температура древесины	$t_p = 29,81$ (H_0 отвергается)	–	$r = -0,5607$ (заметная)
Влажность сушильного агента	$t_p = 14,08$ (H_0 отвергается)	$t_p = 35,66$ (H_0 отвергается)	–

Процесс сушки осуществлялся циклично в зависимости от температуры нагрева доски, фиксируемой по датчику, установленному непосредственно в ней в предварительно-просверленном отверстии (см. рис. 2). Температура нагрева была выставлена на уровне $40\text{ }^\circ\text{C}$, гистерезис — $1\text{ }^\circ\text{C}$ [7, 21].

Работа вентиляционной камеры осуществлялась по верхней (85...90 %) и нижней уставке (60...65 %) по датчику относительной влажности воздуха. Окончание процесса сушки устанавливалось по значению относительной влажности камеры, соответствующему табличным данным влажности древесины для этих условий [7, 21].

Для архивирования всех показателей процесса сушки применялось предварительно установленное на персональном компьютере (ПК) программное обеспечение Owen Process Manager (ОПМ), позволяющее анализировать полученные характеристики технологического процесса, в том числе в формате Excel, в котором в дальнейшем можно получить уравнения кривых процесса сушки, провести корреляционный анализ и получить уравнение регрессии, что впоследствии станет основой для разработки алгоритмов систем автоматического управления процессом сушки пиломатериалов с применением пленочных электронагревателей в камере. Связь между ПК и прибором ТРМ-138 осуществлялось посредством адаптера АС-4.

Результаты и обсуждение

На указанной установке проведены некоторые эксперименты по сушке образцов сосны толщиной 50 мм, длиной 4 м (табл. 2).

Адекватность приведенных значений (см. табл. 2) следует из закономерностей временных показателей и затрат электрической энергии. Полученные кривые всех экспериментов, один из которых (№ 1, см. табл. 2) приведен на рис. 3, схожи и соответствуют известной теории сушки [23, 24].

По результатам проведенного эксперимента № 1 (см. табл. 2) получена выборка значений по измерениям из 2775 квадр: время от начала эксперимента с шагом 3 мин., температура сушильного агента (воздуха в камере); температура сушеного материала (древесины); влажность сушильного агента.

Для первичной оценки полученных экспериментальных данных выполнен корреляционный анализ (табл. 3) [25, 26]. Для этого попарно рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона r по формуле

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X S_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M[X])(Y_i - M[Y])}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - M[X])^2\right) \left(\sum_{i=1}^n (Y_i - M[Y])^2\right)}} \quad (1)$$

где S_X, S_Y — средние квадратичные отклонения случайных величин X и Y соответственно; $M[X], M[Y]$ — математические ожидания случайных величин X и Y соответственно; n — количество пар значений в наборе данных; X, Y — парные случайные величины.

Дополнительно к значению коэффициента корреляции Пирсона определялось соответствующее значение по шкале Чеддока, которое записывалось в скобках.

Для проверки нулевой гипотезы (H_0) о том, что между случайными величинами нет взаимосвязи (случайные величины независимы одна от другой), необходима оценка существенности коэффициента корреляции. При больших объемах выборки в парных корреляциях для данной оценки достаточно использовать t -критерий Стьюдента, рассчитываемый по формуле

$$t_p = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2)$$

На уровне значимости α нулевая гипотеза в парной корреляции отвергается, если расчет-

ное значение t -критерия превысит критическое $t_{кр}(\alpha, n - 2)$.

По данным табл. 3 можно сделать следующие выводы:

1) изменчивость в наборе данных нельзя объяснить ошибкой измерений, явно имеется некоторая взаимная изменчивость;

2) в наборе данных не прослеживаются явно выраженные сильные корреляции;

3) взаимосвязь между температурой древесины и температурой сушильного агента не является сильной, что противоречит физической картине тепломассообмена при сушке.

Таким образом, в целом рассмотрение всего набора данных является ошибочным. Для устранения этой ошибки набор данных был разделен на три диапазона с качественно различными условиями тепломассообмена согласно известной теории сушки [23, 24, 27] (табл. 4–6):

– фаза I — первые двое сут. (от начала сушки до момента времени 2-е сут. 00:00 ч) — продукт обладает большим количеством влаги, которая легко испаряется, при этом сушильный агент перенасыщен влагой, что ведет к активному образованию конденсата на всех частях сушильной камеры (в том числе на продукте);

– фаза II — следующие 16 ч (от 2-х сут. 00:00 ч до 2-х сут. 16:00 ч) — продукт обладает большим количеством влаги, которая легко испаряется, при этом сушильный агент полностью насыщен влагой, конденсат образуется на ограждающих конструкциях (поскольку они имеют температуру ниже продукта);

– фаза III — до окончания сушки (от 2-х сут. 16:00 ч до 6-ти сут. 00:00 ч) — продукт обладает избыточной влагой, сушильный агент поглощает и удаляет всю испаряемую влагу, конденсат в сушильной камере не образуется.

По данным табл. 4–6 можно сделать следующие выводы:

1) изменчивость в наборе данных нельзя объяснить ошибкой измерений;

2) слабые корреляции с влажностью фазы I можно объяснить тем фактом, что измеренная влажность воздуха (в относительных единицах) фактически постоянное значение;

3) усиление корреляций с влажностью фазы II можно объяснить тем, что динамика температуры сушильного агента и древесины близка к линейной;

4) выявленные сильные корреляции по диапазонам согласуются с физической картиной тепломассообмена и соответствуют известной теории сушки, что свидетельствует о корректности разделения всего набора данных на диапазоны;

5) сильные парные корреляции фазы II необходимо дополнительно проверить на наличие автокорреляции в тройках.

Для проверки автокорреляции в тройках (табл. 7) используют формулу множественного коэффициента корреляции Пирсона [23, 24]

$$r_{Z(X,Y)} = \sqrt{\frac{r_{XZ}^2 + r_{YZ}^2 - 2r_{XZ}r_{YZ}r_{XY}}{1 - r_{XY}^2}}. \quad (3)$$

Т а б л и ц а 4

Корреляционная матрица по диапазону фазы I
Correlation matrix for the phase I range

$n = 958$ $t_{кр}(5\%, 956) = 1,96$	Температура сушильного агента	Температура древесины	Влажность сушильного агента
Температура сушильного агента	–	$r = 0,9941$ (практически функциональная)	$r = 0,3314$ (умеренная)
Температура древесины	$t_p = 480,83$ (H_0 отвергается)	–	$r = 0,3388$ (умеренная)
Влажность сушильного агента	$t_p = 18,50$ (H_0 отвергается)	$t_p = 18,96$ (H_0 отвергается)	–

Т а б л и ц а 5

Корреляционная матрица по диапазону фазы II
Phase II range correlation matrix

$n = 319$ $t_{кр}(5\%, 317) = 1,96$	Температура сушильного агента	Температура древесины	Влажность сушильного агента
Температура сушильного агента	–	$r = 0,9856$ (очень сильная)	$r = -0,7796$ (сильная)
Температура древесины	$t_p = 306,40$ (H_0 отвергается)	–	$r = -0,7090$ (сильная)
Влажность сушильного агента	$t_p = 65,55$ (H_0 отвергается)	$t_p = 52,94$ (H_0 отвергается)	–

Т а б л и ц а 6

Корреляционная матрица по диапазону фазы III

Phase III range correlation matrix

$n = 1498$ $t_{кр}(5\%, 1496) = 1,96$	Температура сушильного агента	Температура древесины	Влажность сушильного агента
Температура сушильного агента	–	$r = 0,3413$ (слабая)	$r = 0,7454$ (сильная)
Температура древесины	$t_p = 19,12$ (H_0 отвергается)	–	$r = 0,1284$ (слабая)
Влажность сушильного агента	$t_p = 58,89$ (H_0 отвергается)	$t_p = 6,82$ (H_0 отвергается)	–

Т а б л и ц а 7

Проверка корреляций в тройках в диапазоне фазы II

Checking correlations in triples in the phase II range

Параметр	Возмущающая пара	Коэффициент корреляции r
Температура сушильного агента	Температура древесины и влажность сушильного агента	0,9922 (практически функциональ- ная)
Температура древесины	Температура и влажность сушильного агента	0,9901 (практически функциональ- ная)
Влажность сушильного агента	Температура сушильного агента и температура древесины	0,8548 (сильная)

Общие выводы по результатам корреляционного анализа:

1) полученные экспериментальные данные подтверждают неслучайность изменения всех измеряемых величин;

2) по виду множества точек фазы I можно предположить, что изменение температур носит известный из теории сушки характер (функция вида $1 - e^{-x}$); этот же вывод справедлив для влажности и температуры сушильного агента на диапазоне фазы III (функция вида e^{-x}); прочие функции в первом приближении можно рассматривать как линейные;

3) целесообразно проводить регрессионный анализ в независимых парах величин: время — температура сушильного агента; время — температура древесины; для влажности регрессионный анализ не имеет смысла;

4) по экспериментальным данным фазы III четко прослеживается прерывистый режим сушки, что должно быть учтено при анализе.

Регрессионный анализ для температуры. Целевая функция

Рассматриваемый набор экспериментальных данных отражает картину сушки капиллярно-пористого тела [28–31]. Учитывая сложность процессов теплообмена, нахождение функции кривой нагрева возможно разными способами. Так, например, известно

общее выражение для кривой нагрева тела в наиболее простом случае при соблюдении следующих условий:

- температура окружающей среды неизменна;
- теплоотдача A нагреваемого тела не изменяется в течение нагрева;
- теплоемкость C нагреваемого тела не изменяется в течение нагрева;
- к нагреваемому телу подводится постоянный поток теплоты P .

Данные допущения можно применить и для процессов теплообмена (где не стабильны теплоемкость и теплоотдача) с оговоркой, что в рассматриваемом диапазоне времени параметры можно усреднить, причем ошибка будет ниже, если параметры будут изменяться монотонно.

С учетом приведенных допущений можно получить уравнение теплового баланса

$$P \cdot dt = C \cdot d\tau + A \cdot dt. \quad (4)$$

Решение данного дифференциального уравнения для превышения температуры τ при граничном условии $\tau(0) = \tau_n$ имеет вид

$$\tau(t) = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (5)$$

где $\tau_y = \frac{P}{A}$ — установившееся превышение температуры нагревателя над температурой окружающей среды;

$T_n = \frac{C}{A}$ — постоянная нагрева.

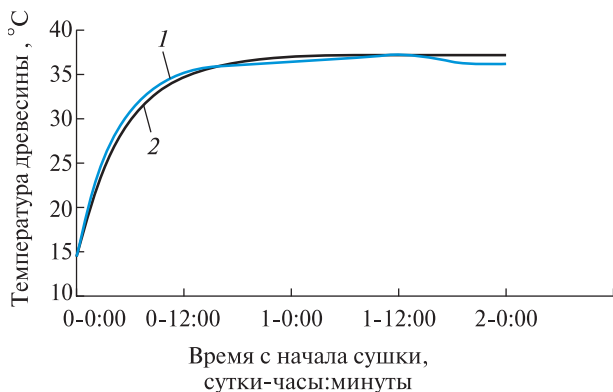


Рис. 4. Регрессионный анализ диапазона фазы I для температуры древесины (параметры функции: $\tau_n = 14,66$ °C; $\tau_y = 37,2$ °C; $T_n = 327,24$ мин по 478 из 958 точек; $R^2 = 0,9780$); *здесь и на рис. 5–7: 1 — опыт; 2 — теория*

Fig. 4. Regression analysis on the phase I range for wood temperature (function parameters: $\tau_n = 14,66$ °C; $\tau_y = 37,2$ °C; $T_n = 327,24$ min at 478 of 958 points; $R^2 = 0,9780$); *1 — experience; 2 — theory*

При одинаковом смещении установившегося и начального значения превышения температуры вид функции и ее динамика не изменяются, что отражает важное свойство функции (5). Таким образом, появляется возможность проведения расчетов с помощью температуры.

Для уравнения (5) невозможно методом наименьших квадратов определить все параметры одновременно. По этой причине целесообразно их установить опытным путем, подбирая превышения температуры и определяя методом наименьших квадратов такое значение T_n в вычислительных средах, которое поможет добиться большего значения коэффициента детерминации R^2 .

При таких условиях постоянную нагрева T_n определяют по формуле

$$T_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\left(\frac{\tau_y - \tau_n}{\tau_y - \tau_i} \right)} \quad (6)$$

Формулу (6) нельзя механически применить для всего набора точек. Так, подстановка начального превышения температуры в момент времени 0 приводит к ошибке вычислений, поэтому первую точку необходимо исключить.

В силу асимптотического приближения значения функции к значению τ_y вес точек перестает быть одинаковым и большое количество точек, близких к значению τ_y , смещает оценку T_n в большую сторону, тем самым увеличивая ошибку.

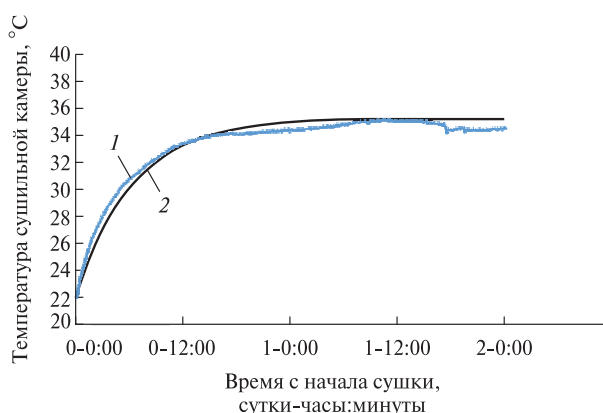


Рис. 5. Регрессионный анализ диапазона фазы I для температуры сушильной камеры (параметры функции: $\tau_n = 22,05$ °C; $\tau_y = 35,2$ °C; $T_n = 378,87$ мин по 478 из 958 точек; $R^2 = 0,9564$)

Fig. 5. Regression analysis for digital camera operators (parameters: $\tau_n = 22,05$ °C; $\tau_y = 35,2$ °C; $T_n = 378,87$ min at 478 of 958 points; $R^2 = 0,9564$)

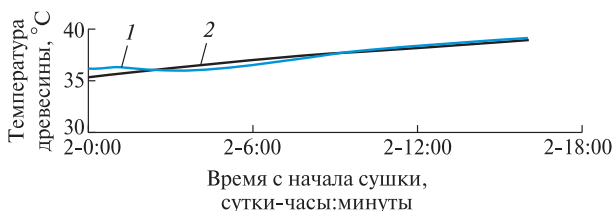


Рис. 6. Регрессионный анализ диапазона фазы II для температуры древесины (параметры функции: $\tau_n = 35,3$ °C; $\tau_y = 42$ °C; $T_n = 1250,41$ мин по 318 из 319 точек; $R^2 = 0,9145$)

Fig. 6. Regression analysis on the phase II range for wood temperature (function parameters: $\tau_n = 35,3$ °C; $\tau_y = 42$ °C; $T_n = 1250,41$ min at 318 of 319 points; $R^2 = 0,9145$)

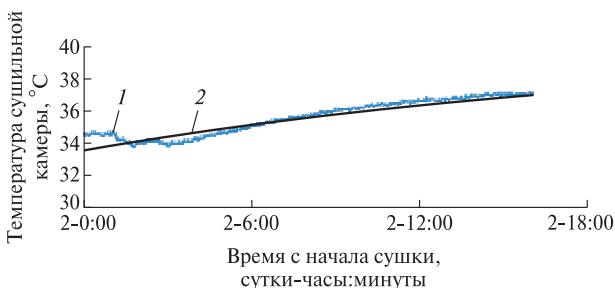


Рис. 7. Регрессионный анализ диапазона фазы II для температуры сушильной камеры (параметры функции: $\tau_n = 33,5$ °C; $\tau_y = 40$ °C; $T_n = 1228,44$ мин по 308 из 319 точек; $R^2 = 0,9048$)

Fig. 7. Regression analysis on the phase II range for the temperature of the drying chamber (function parameters: $\tau_n = 33,5$ °C; $\tau_y = 40$ °C; $T_n = 1228,44$ min at 308 of 319 points; $R^2 = 0,9048$)

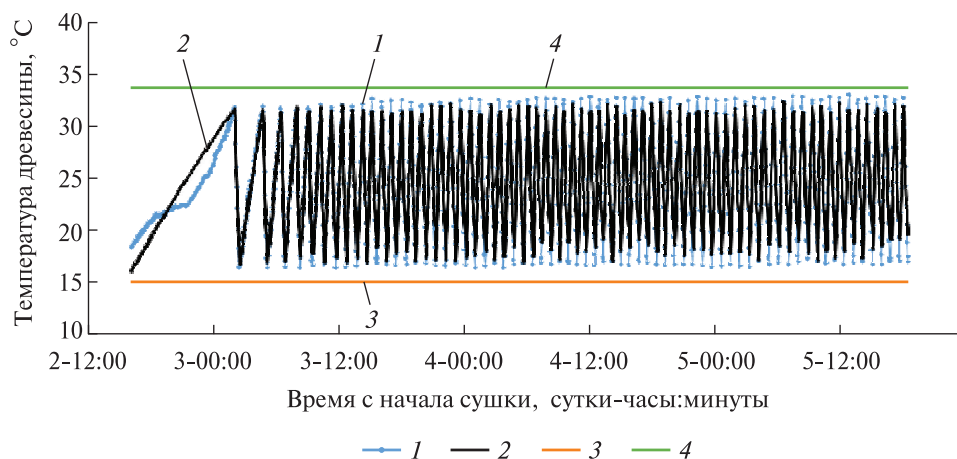


Рис. 8. Регрессионный анализ диапазона фазы III для температуры древесины (параметры модели: $\tau_y = 50^\circ\text{C}$ ($38,8^\circ\text{C}$); $R^2 = 0,9211$; предсказательный интервал $39,96 \pm 1,288^\circ\text{C}$ на уровне значимости 5 %); *здесь и на рис. 9:* 1 — опыт; 2 — теория; 3 — нижняя граница (5 %); 4 — верхняя граница (5 %)

Fig. 8. Regression analysis in the phase III range for wood temperature (model parameters: $\tau_y = 50^\circ\text{C}$ ($38,8^\circ\text{C}$); $R^2 = 0,9211$; predictive interval $39,96 \pm 1,288^\circ\text{C}$ at a significance level of 5 %); *here and in Fig. 9:* 1 — experience; 2 — theory; 3 — lower bound (5%); 4 — upper bound (5%)

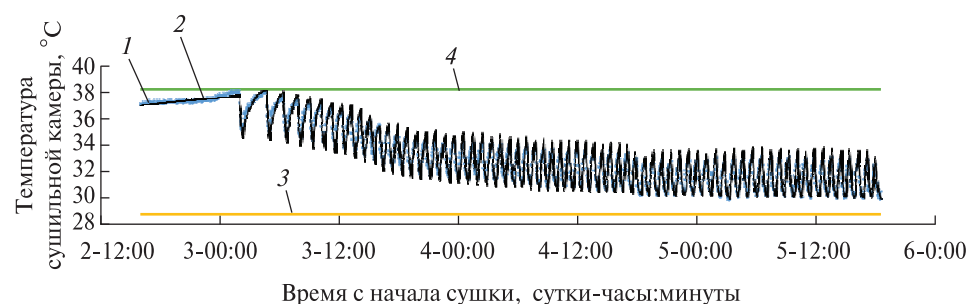


Рис. 9. Регрессионный анализ диапазона фазы III для температуры сушильной камеры (параметры модели: $\tau_y = 38,5^\circ\text{C}$ ($29,75^\circ\text{C}$); $R^2 = 0,9864$; предсказательный интервал $33,49 \pm 4,775^\circ\text{C}$ на уровне значимости 5 %)

Fig. 9. Regression analysis on the phase III range for the temperature of the drying chamber (model parameters: $\tau_y = 38,5^\circ\text{C}$ ($29,75^\circ\text{C}$); $R^2 = 0,9864$; predictive interval $33,49 \pm 4,775^\circ\text{C}$ at a significance level of 5 %)

В связи с этим в дальнейших расчетах значение T_n сначала будет рассчитываться по всему диапазону данных, а затем с конца будут последовательно удалять слагаемые до тех пор, пока коэффициент детерминации R^2 не начнет уменьшаться. Полученное таким образом значение T_n можно использовать в дальнейших расчетах.

Поскольку количество исходных опытных точек для превышения температуры достаточно велико, оценка доверительной и предсказательной областей не проводится.

Результаты регрессионного анализа по диапазонам фаз I и II приведены на рис. 4–7.

На фазе III отмечаются явно выраженные колебания температуры, обусловленные преры-

вистым режимом сушки. Отталкиваясь от допущения, что система автоматического управления осуществляет включения и отключения постоянного нерегулируемого нагревателя по достижении температуры уставки теплового реле (с непостоянными временными интервалами), целесообразно выполнить разделение набора точек фазы III на поддиапазоны. Общий объем набора данных фазы III составляет 1489 точек. Разделение на поддиапазоны выполнялось в электронных таблицах следующим образом:

1) к набору данных добавили новый столбец, значения в котором могут принимать +1 или -1;

2) значение +1 для точки присваивается, если температура в данной точке превышает



Рис. 10. Расчетные значения постоянной нагрева T_n по периодам с включенным и отключенным нагревателем для древесины по поддиапазнам фазы III

Fig. 10. Values of the heating constant T_n for wood in the sub-ranges of phase III

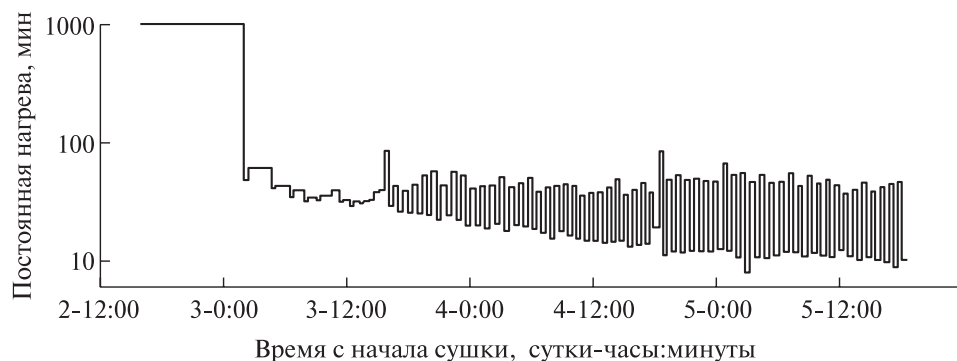


Рис. 11. Расчетные значения постоянной нагрева T_n по периодам с включенным и отключенным нагревателем для сушильной камеры по поддиапазнам фазы III

Fig. 11. Values of the heating constant T_n for the drying chamber in the sub-ranges of phase III

температуру предыдущей точки; значение -1 для точки присваивается, если температура в данной точке ниже температуры предыдущей точки;

3) первой точке присвоено значение $+1$ вручную;

4) полученные результаты просматривались на предмет возможных выбросов под влиянием случайных факторов — для таких точек значение столбца изменялось вручную.

Таким образом, есть возможность разделить 1489 исходных точек набора данных диапазона фазы III на 136 поддиапазонов с наборами данных объемом от 7 до 199 точек. На каждом поддиапазоне принималось одинаковое значение τ_y . Начальное значение τ_n принималось по первой точке соответствующего диапазона. Поскольку некоторые из поддиапазонов малы по объему набора данных, никакие точки не исключались, ошибку вычислений в первой

точке набора данных устранили путем введения добавочного уменьшения τ_n на величину $0,01$ °C. Подобная манипуляция не вносит существенной погрешности в вычисления, однако позволяет сохранить весь набор точек поддиапазона для расчетов.

Результаты регрессионного анализа по данной модели для диапазона фазы III приведены на рис. 8–11. Для кривых нагрева на рис. 8 и 9 выделены предсказательные интервалы на уровне значимости 5 % (при соблюдении условий повторяемости и воспроизводимости 95 % всех возможных значений с учетом будущих укладывается в границы данного интервала). Установившиеся значения температуры указаны для поддиапазонов с включенным и отключенным нагревателем различно.

Как видно, в диапазоне фазы III температура древесины изменяется на всем диапазоне в узком интервале ($\pm 1,288$ °C), что позволяет

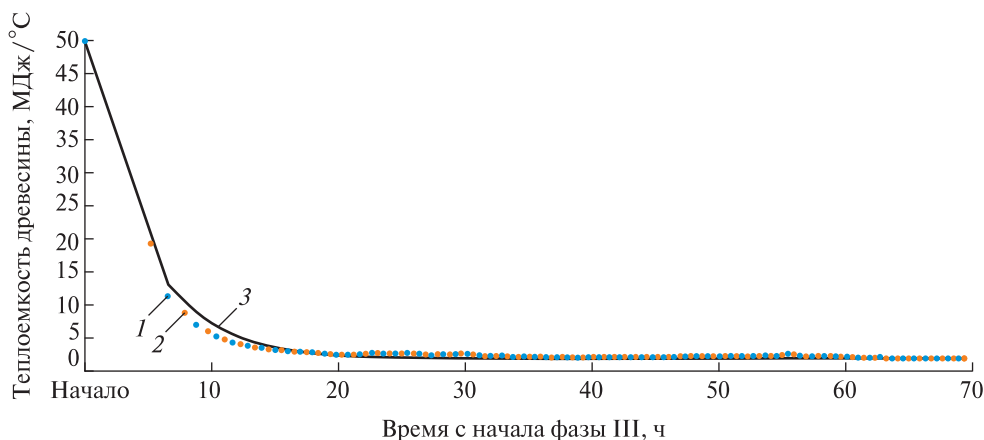


Рис. 12. Динамика теплоемкости древесины (теоретическое моделирование при $C_n = 49,807$ МДж/°С; $C_y = 1,915$ МДж/°С; $B = 4,528$ ч по 29 точкам из 136; $R^2 = 0,9991$: 1 — включено; 2 — отключено; 3 — теория

Fig. 12. Dynamics of the heat capacity of wood (theoretical modeling at $C_n = 49,807$ MJ/°C; $C_y = 1,915$ MJ/°C; $B = 4,528$ h at 29 points out of 136; $R^2 = 0,9991$): 1 — enabled; 2 — disabled; 3 — theory

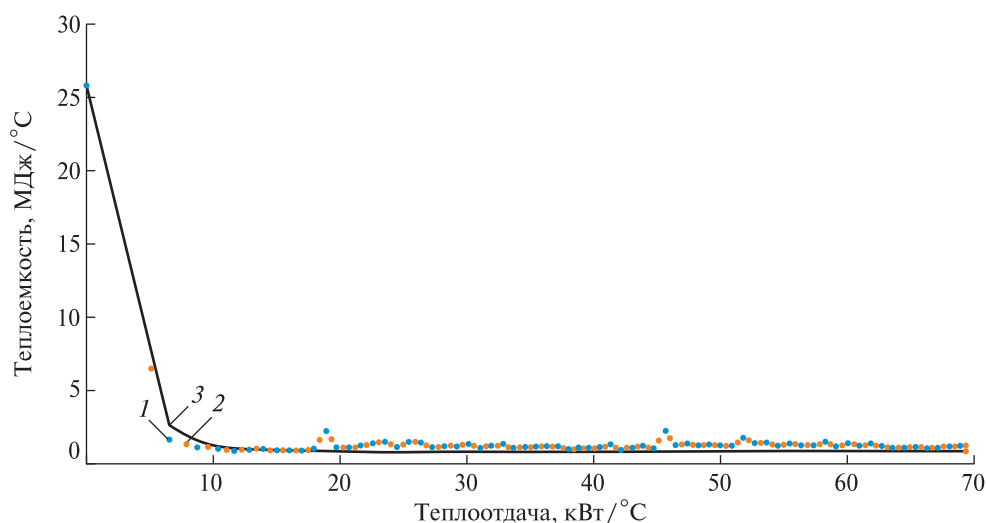


Рис. 13. Динамика теплоемкости сушильной камеры (теоретическое моделирование при $C_n = 25,705$ МДж/°С; $C_y = 0,8249$ МДж/°С; $B = 2,458$ ч по 11 точкам из 136; $R^2 = 0,9471$): 1 — включено; 2 — отключено; 3 — теория

Fig. 13. Dynamics of the heat capacity of the drying chamber (theoretical modeling at $C_n = 25,705$ MJ/°C; $C_y = 0,8249$ MJ/°C; $B = 2,458$ h at 11 points out of 136; $R^2 = 0,9471$): 1 — enabled; 2 — disabled; 3 — theory

предположить достижение квазистационарного теплового режима. Вместе с тем в сушильной камере в целом предсказательный интервал достаточно широкий ($\pm 4,775^\circ\text{C}$), однако с периода 3-х сут. 18:00 ч колебания температуры становятся похожими на квазистационарный тепловой режим. Эти же наблюдения подтверждаются (рис. 12, 13): колебания постоянной нагрева T_n по древесине слабы после момента времени 3-х сут. 15:00 ч и могут быть объяснены влиянием случайной ошибки; это же

справедливо для постоянной нагрева по сушильной камере после момента времени 4-х сут. 16:00 ч.

Гипотезу можно сформулировать следующим образом: окончание процессов теплообмена с переходом режимы работы установки в квазистационарный тепловой режим происходит до завершения фактического периода сушки. Для проверки этого необходимо оценить динамику теплоемкости и теплоотдачи в процессе сушки [32, 33].

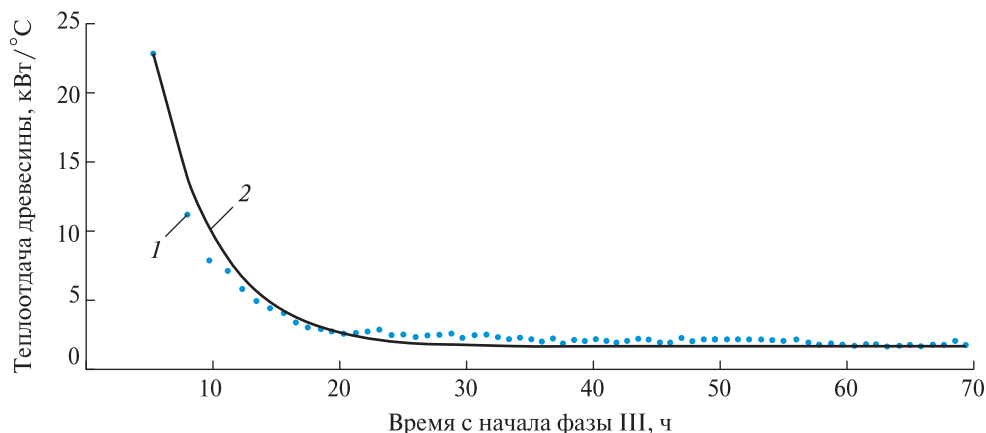


Рис. 14. Динамика теплоотдачи древесины (теоретическое моделирование при $A_n = 22,87$ кВт/°С; $A_y = 1,672$ кВт/°С; $B = 4,89$ ч по 14 точкам из 68; $R^2 = 0,9533$): 1 — опыт; 2 — теория

Fig. 14. Dynamics of heat transfer of wood (theoretical modeling at $A_n = 22,87$ kW/°C; $A_y = 1,672$ kW/°C; $B = 4,89$ h at 14 points out of 68; $R^2 = 0,9533$): 1 — experience; 2 — theory

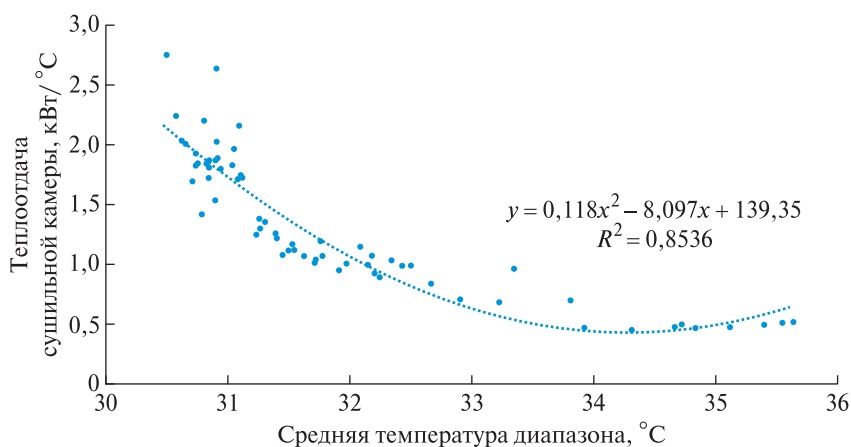


Рис. 15. Взаимосвязь между теплоотдачей сушильной камеры и средними значениями температуры по поддиапазонам с отключенным нагревателем

Fig. 15. The relationship between the heat transfer of the drying chamber and the average temperatures in the sub-ranges with the heater turned off

В целях оценки значений теплоемкости и теплоотдачи было сделано следующее (на примере древесины):

1) принимая температуру окружающей среды за 14 °С, выполнили расчет фактического превышения температуры (например, по древесине — 36 °С), если из модели известны установившиеся значения температуры для поддиапазонов с включенным нагревателем;

2) нагревателями выступают щиты пленочных нагревателей с известной мощностью 10,8 кВт;

3) значение теплоотдачи оценивали по формуле

$$A = \frac{P}{\tau_y},$$

т. е. теплоотдача не изменяется во времени для периодов с включенным нагревателем;

4) значение теплоемкости оценивали по формуле $C = AT_n$ на каждом из 68 поддиапазонов с включенным нагревателем;

5) выявили поддиапазон с отключенным нагревателем, для которого не может быть резких колебаний теплоемкости, находящийся между двумя смежными поддиапазонами с включенным нагревателем;

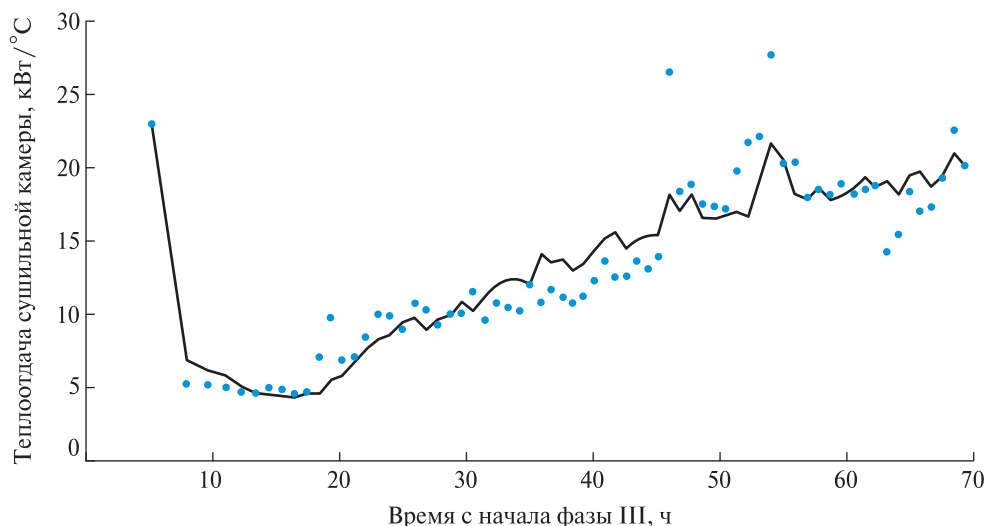


Рис. 16. Динамика теплоотдачи сушильной камеры ($A_n = 2,288$ кВт/°C; $B = 0,75$ ч; коэффициент детерминации модели $R^2 = 0,8588$): 1 — опыт; 2 — теория
Fig. 16. Dynamics of heat transfer of the drying chamber ($A_n = 2,288$ kW/°C; $B = 0,75$ h; coefficient of determination of the model $R^2 = 0,8588$): 1 — experience; 2 — theory

б) выполнили расчет значения теплоемкости на поддиапазонах с отключенным нагревателем с помощью линейной аппроксимации от значений теплоемкости на смежных поддиапазонах с включенным нагревателем с учетом продолжительности этих поддиапазонов;

7) оценили естественную теплоотдачу (без учета искажения конвективных потоков за счет теплового возмущения от нагревателя) по известным теплоемкости и постоянных нагрева для поддиапазонов с отключенным нагревателем.

Результаты определения теплоемкости древесины и сушильной камеры, а также теплоотдачи древесины приведены на рис. 12–16. На расчетные точки наложена функция вида

$$C(t) = C_y \left(1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) + C_n e^{-\frac{t}{B}}, \quad (7)$$

где C — теплоемкость;

C_y — предельное значение теплоемкости, Дж/°C;

C_n — начальное значение теплоемкости, Дж/°C;

B — постоянная времени, ч.

$$A(t) = A_y \left(1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) + A_n e^{-\frac{t}{B}}, \quad (8)$$

где A_y — предельное значение теплоотдачи, Вт/°C;

A_n — начальное значение теплоотдачи, Вт/°C;

B — постоянная времени, ч.

Т а б л и ц а 8

Завершение массообменных процессов на уровне 1 %

Completion of mass transfer processes at level 1 %

Процессы	По параметрам древесины	По параметрам сушильной камеры
Для теплоемкости	3-е сут. 17:51 ч	3-е сут. 13:21 ч
Для теплоотдачи	4-е сут. 00:45 ч	3-е сут. 05:29 ч

Расчет постоянной B выполнен аналогично расчету T_n по формуле (6).

Для теплоотдачи сушильной камеры применена иная модель. В частности, учтено, что за счет колебаний температуры нагретого тела коэффициент конвективного теплообмена может существенно изменяться.

Таким образом, сначала была установлена взаимосвязь между теплоотдачей сушильной камеры и средними значениями температуры поддиапазонов с отключенным нагревателем (см. рис. 15) предполагалось, что процессы тепломассообмена не оказывают существенного влияния, в связи с чем исключена первая точка из общего количества — 68.

Для моделирования была применена зависимость вида

$$A(t) = (A_n - f(\tau_0)) e^{-\frac{t}{B}} + f(\tau_{ND}), \quad (9)$$

где $f(\tau_{ND})$ — полиномиальная функция теплоотдачи от средних температур на поддиапазонах;

$f(\tau_0)$ — поправка теплоотдачи на начальную температуру.

На основании полученных зависимостей и с учетом того факта, что функция вида e^{-x} асимптотически приближается к установившемуся значению, можно оценить время окончания процессов теплообмена, предположив, что изменением значения менее 1 % можно пренебречь.

По данным табл. 8 видно, что фактически процессы теплообмена можно считать завершившимися с момента времени 4-х сут. 00:45 ч, тогда как работа сушильной камеры продолжалась до 5 сут. 18:33 ч. Это объясняется тем, что для установления желаемой абсолютной величины влагосодержания в древесине необходимо создать равновесные условия в камере, а именно: стабилизировать параметры относительной влажности и температуры воздуха. Стабилизация параметров в рассматриваемом эксперименте, т. е. продолжение работы сушилки, составило одни полные сутки и 18 ч, что несомненно увеличивает расход электрической энергии.

Применение камеры с разряженной средой (вакуум) является одним из вариантов снижения затрат электрической энергии и времени сушки в установке с применением пленочных электронагревателей [8].

Выводы

Анализ экспериментальных кривых сушки, регрессионный анализ которых был проведен для диапазонов фаз I, II, III с полученными функциями для каждой из них позволяет в дальнейшем проводить математическое моделирование режимов сушки древесины в установке на основе пленочных электронагревателей.

Полученные кривые динамики изменения теплоемкости и теплоотдачи, функции которых позволяют оценивать завершение процессов теплообмена, могут позволить прогнозировать окончание фактического периода сушки в зависимости от установленной мощности пленочных электронагревательных элементов, рассчитанных на высушивание 1 м³ древесины, а также в зависимости от их температуры нагрева, которая должна коррелироваться со спектральной характеристикой высушиваемого объекта [34–36].


Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>.

Список литературы

- [1] Деянов Д.И., Косарин А.А., Моисеев С.А., Курьшов Г.Н. Импульсная сушка заготовок из древесины ироко, мербау и венге в конвективной сушильной камере // Лесной вестник / ForestryBulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 143–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-143-149
- [2] Моисеев С.А., Деянов Д.И., Косарин А.А., Курьшов Г.Н. Импульсная сушка заготовок из древесины красного и черного дерева в конвективных сушильных камерах // Лесной вестник / ForestryBulletin, 2022. Т. 26. № 5. С. 112–119. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-112-119
- [3] Косарин А.А., Курьшов Г.Н. Импульсные режимы сушки для заготовок из древесины ироко // Научные труды Московского государственного университета леса, 2011. № 353. С. 27.
- [4] Косарин А.А., Курьшов Г.Н., Красухина Л.П., Петяйкина Е.Г. Сушка американского ореха импульсными режимами // Научные труды Московского государственного университета леса, 2015. № 377. С. 91.
- [5] Чернышев А.Н., Ефимова Т.В. Исследование процесса сушки древесины вишни и черешни без искусственного увлажнения в конвективных сушильных камерах периодического действия // Лесотехнический журнал, 2012. №2(6). С. 47–53.
- [6] Skarbalius G., Džiugys A., Navakas R. A novel method for convective drying rate estimation in a deep fixed porous material bed // Powder Technology, 2022, v. 404, p. 117499. DOI:10.1016/j.powtec.2022.117499
- [7] Левинский В.Н., Филатов М.В. К вопросу об ИК-сушке массивных спилов из ценных пород древесины // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК, 2023. № 2(18). С. 20–26.
- [8] Levinskiy V.N. Comparative experiment on the use of a film electric heater for drying wood in vacuum conditions // 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.
- [9] Поляков С.И., Лубков В.О. Совершенствование автоматизированного управления роликовой сушилкой для сушки шпона // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2018. Т. 6. № 4(40). С. 361–366.
- [10] Дунаев А.М., Дунаев М.П. Автоматизированная система научных исследований технологического процесса сушки древесины // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2019. Т. 23. № 3(146). С. 443–450.
- [11] Манасян С.К., Демский Н.В., Лунева Т.А., Манасян М.С., Куликов Н.Н. Моделирование и оптимизация процессов сушки // Вестник КрасГАУ, 2010. № 12(51). С. 128–133.
- [12] Аипов Р.С., Тухватуллин М.И., Яруллин Р.Б., Кабашов В.Ю. Математическая модель процесса сушки пиломатериалов при дискретном расположении источников СВЧ-энергии // Вестник Башкирского государственного аграрного университета, 2019. № 2(50). С. 82–88. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-82-89

- [13] Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A. Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply // *ChemChem-Tech*, 2019, t. 62, no. 12, pp. 94–100.
- [14] Андрианов Н.М., Мэй Ш., Сюе Ю. Идентификация шахтной зерносушилки в условиях нормальной работы // *Фундаментальные исследования*, 2015. № 2–16. С. 3459–3465.
- [15] Захахатнов В.Г., Кашин П.В., Коковин Г.Д. Планирование эксперимента по исследованию времени сушки зерна в шахтной сушилке // *АПК России*, 2018. Т. 25. № 3. С. 400–404.
- [16] Афонькина В.А., Захахатнов В.Г., Майоров В.И., Попов В.М. К вопросу управления процессом комбинированной сушки зерна // *Вестник Мордовского университета*, 2016. Т. 26. № 1. С. 32–33. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201601.032-039
- [17] Захахатнов В.Г., Кашин П.В. Определение начальной влажности зерна при сушке по времени его нагрева // *Вестник ВИЭСХ*, 2018. № 1(30). С. 33–37.
- [18] Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Особенности тепломассообмена при сушке пиломатериалов бесступенчатыми режимами // *Хвойные бореальной зоны*, 2019. Т. 37. № 2. С. 139–143.
- [19] Епишков Е.Н., Ткачев А.Н., Баженова С.В. Математическая модель распределения температуры по поверхности пленочного электронагревателя с токоведущей частью в виде ленты из высокоомного материала // *Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения: сб. трудов VI Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., Челябинск, 25 января 2022 г. Челябинск: Изд-во Южно-Уральского технологического университета*, 2022. С. 10–17.
- [20] Косарин А.А. Технология импульсной сушки пиломатериалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012.
- [21] Попов В.М., Афонькина В.А., Шукшина Е.И. Способ сушки древесины. Пат. № 2514576 РФ, МПК F26B 3/34 F26B 3/353, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», № 2012134370/06; заявл. 08.10.2012; опубл. 27.04.2014. Бюл. № 12.
- [22] Епишков Н.Е., Епишков Е.Н., Глухов С.В., Зверев А.Л., Паламарчук В.П. Способ сушки древесины. Пат. № 2367861 РФ, МПК F26B 3/20, № 2008111441/06; заявл. 24.03.2008; опубл. 20.09.2009
- [23] Колобаева А.А., Котик О.А., Панина Е.В., Чернышова К.Д. Исследование кинетики сушки растительного сырья // *Технология и товароведение сельскохозяйственной продукции*, 2021. № 2(17). С. 154–160
- [24] Рудобашта С.П., Дорняк О.Р., Дмитриев В.М. Расчет кинетики сушки пластины с учетом ее усадки // *Теоретические основы химической технологии*, 2021. Т. 55. № 5. С. 612–617. DOI: 10.31857/S004035712104014X
- [25] Изяков Ф.Я. Планирование эксперимента и обработка опытных данных. Челябинск: Изд-во Челябинского ГАУ, 2003. 103 с.
- [26] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
- [27] Рудак О.Г. Исследование параметров технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*, 2021. № 2(246). С. 268–276.
- [28] Протасов С.К., Матвейко Н.П., Боровик А.А. Исследование кинетики сушки слоя капиллярно-пористого дисперсного материала // *Химическая промышленность*, 2019. Т. 96. № 2. С. 87–94.
- [29] Стородубцева Т.Н., Томилин А.И. Исследование водопоглощения древесины лиственных и хвойных пород, результаты испытаний // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2013. № 5. С. 331–336.
- [30] Артемов И.Н. Использование уравнений регрессии для входящего и выходящего потока сушильного агента для экспериментальной сушильной камеры конденсационного типа // *Инновации и инвестиции*, 2022. № 2. С. 152–154.
- [31] Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. ИК-сушка пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле // *Инженерно-физический журнал*, 2022. Т. 95. № 2. С. 364–372.
- [32] Зарипов Ш.Г., Чижов А.П., Корниенко В.А., Семенова Н.И. Влияние водорастворимых веществ на распределение влажности в листовенных пиломатериалах перед сушкой // *ИЗВУЗ Лесной журнал*, 2019. № 6 (372). С. 185–193.
- [33] Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Tannous K., Овчинников Л.Н. Расчетно-экспериментальное исследование гранулирования в реакторе с кипящим слоем // *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*, 2019. Т. 62. № 5. С. 97–103.
- [34] Levinskiy V.N. Spectral analysis of various types of wood as the basis of low-temperature drying technology in vacuum conditions // *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. С. 05026.
- [35] Меркелов В.М., Романов В.А., Михеенко В.В. Программа выбора коэффициентов для расчета тепловых потерь через ограждения лесосушильных камер // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2014. № 40. С. 82–85.
- [36] Попов В.М., Афонькина В.А., Шукшина Е.И. Сушка термолабильных культур в ИК-диапазоне с учетом оптических свойств продукта // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*, 2012. № 37(296). С. 90–92.

Сведения об авторах

Левинский Василий Николаевич  — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», lv_74rus@mail.ru

Уразов Сергей Игоревич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», eskaton@mail.ru

Афонькина Валентина Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», afva82@mail.ru

Поступила в редакцию 02.04.2024.

Одобрено после рецензирования 13.09.2024.

Принята к публикации 19.11.2024.

REGRESSION ANALYSIS OF IR WOOD DRYING PROCESS IN INSTALLATION USING MEMBRANOUS ELECTRIC HEATERS

V.N. Levinsky , S.I. Urazov, V.A. Afon'kina

South Ural State Agrarian University, 13, Gagarin st., 457103, Troitsk, Chelyabinsk reg., Russia

Lv_74rus@mail.ru

The analysis of the problems of creating automatic control systems for drying plants based on low-temperature infrared generators, which are gaining popularity, is presented. The methods and means of obtaining a mathematical model of infrared drying of wood using film electric heaters developed by scientists of the Institute of Agroengineering of the South Ural State Agrarian University of Chelyabinsk are described. The description of an experimental drying plant and an automatic control system for the drying process with the function of archiving all indicators of technological parameters necessary to obtain dynamic temperature and humidity curves is given. The article uses the method of correlation and regression analysis to establish a relationship between the parameters of the technological process of drying pine lumber. Natural experiments on low-temperature drying of pine boards stacked have been carried out, according to the results of which the correspondence of the obtained temperature and humidity-time dependences with the kinetic curves of the known drying theory has been determined. A detailed regression analysis was performed based on the obtained data set of the main drying parameters (time, temperature and humidity in the chamber, wood temperature). The effective splitting of the drying kinetics curve into 3 sub-ranges is proved, characterized by their own thermal dynamics parameters, the mathematical models of which became the basis for the algorithms of an intelligent automatic control system. Practical recommendations have been developed on the organization of infrared drying of lumber, the creation and adjustment of automatic control systems. Based on the dynamic characteristics of the dryer as a result of new knowledge, it is possible to determine the type and settings of the regulators through the transmission functions of the ACS. The hypothesis is confirmed that the end of mass transfer processes with the transition of the installation to a quasi-stationary thermal regime occurs before the end of the actual drying period.

Keywords: IR drying, wood, mathematical model, regression analysis, film electric heater

Suggested citation: Levinskiy V.N., Urazov S.I., Afon'kina V.A. *Regressionnyy analiz protsessa infrakrasnoy sushki drevesiny v ustanovke s primeneniem plenochnykh elektronagrevateley* [Regression analysis of IR wood drying process in installation using membranous electric heaters]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 126–143. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-126-143

References

- [1] Deyanov D.I., Kosarin A.A., Moiseev S.A., Kuryshov G.N. Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny iroko, merbau i wenge v konvektivnoy sushil'noy kamere [Impulse drying of african teak, merbau and wenge wood blanks in a convection drying chamber]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 143–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-143-149

- [2] Moiseev S.A., Deyanov D.I., Kosarin A.A., Kuryshov G.N. Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny krasnogo i chernogo dereva v konvektivnykh sushil'nykh kamerakh [Redwood and ebony blanks impulse convective drying]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 112–119. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-112-119
- [3] Kosarin A.A., Kuryshov G.N. *Impul'snye rezhimy sushki dlya zagotovok iz drevesiny iroko* [Pulse drying modes for iroko wood blanks]. *Nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Scientific works of the Moscow State Forest University], 2011, no. 353, p. 27.
- [4] Kosarin A.A., Kuryshov G.N., Krasukhina L.P., Petyaykina E.G. *Sushka amerikanskogo orekha impul'snymi rezhimami* [Drying of American walnut using pulse modes]. *Nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Scientific works of Moscow State Forest University], 2015, no. 377, p. 91.
- [5] Chernyshev A.N., Efimova T.V. *Issledovanie protsessa sushki drevesiny vishni i chereshni bez iskusstvennogo uvlazhneniya v konvektivnykh sushil'nykh kamerakh periodicheskogo deystviya* [Investigation of the drying process of cherry and cherry wood without artificial humidification in convective drying chambers of periodic action]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry J.], 2012, no. 2(6), pp. 47–53.
- [6] Skarbalius G., Džiugys A., Navakas R. A novel method for convective drying rate estimation in a deep fixed porous material bed. *Powder Technology*, 2022, v. 404, p. 117499. DOI:10.1016/j.powtec.2022.117499
- [7] Levinskiy V.N., Filatov M.V. *K voprosu ob IK-sushke massivnykh spilov iz tsennykh porod drevesiny* [On the issue of IR drying of massive cuts from valuable wood species]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik: Tekhnicheskie sistemy v APK* [Scientific and technical bulletin: Technical systems in agriculture], 2023, no. 2(18), pp. 20–26.
- [8] Levinskiy V.N. Comparative experiment on the use of a film electric heater for drying wood in vacuum conditions. *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.
- [9] Polyakov S.I., Lubkov V.O. *Sovershenstvovanie avtomatizirovannogo upravleniya rolikovoy sushilkoy dlya sushki shpona* [Improvement of automated control of a roller dryer for drying veneer]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2018, v. 6, no. 4(40), pp. 361–366.
- [10] Dunaev A.M., Dunaev M.P. *Avtomatizirovannaya sistema nauchnykh issledovaniy tekhnologicheskogo protsessa sushki drevesiny* [Automated system of scientific research of the technological process of wood drying]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2019, v. 23, no. 3(146), pp. 443–450.
- [11] Manasyan S.K., Demskiy N.V., Luneva T.A., Manasyan M.S., Kulikov N.N. *Modelirovanie i optimizatsiya protsessov sushki* [Modeling and optimization of drying processes]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2010, no. 12(51), pp. 128–133.
- [12] Aipov R.S., Tukhvatullin M.I., Yarullin R.B., Kabashov V.Yu. *Matematicheskaya model' protsessa 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]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University], 2019, no. 2(50), pp. 82–88. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-82-89
- [13] Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A. Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply // *ChemChemTech*, 2019, t. 62, no. 12, pp. 94–100.
- [14] Andrianov N.M., Mey Sh., Syue Yu. *Identifikatsiya shakhtnoy zernosushilki v usloviyakh normal'noy raboty* [Identification of a mine grain dryer in conditions of normal operation]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, no. 2–16, pp. 3459–3465.
- [15] Zakhkhatnov V.G., Kashin P.V., Kokovin G.D. *Planirovanie eksperimenta po issledovaniyu vremeni sushki zerna v shakhtnoy sushilke* [Planning an experiment to study the drying time of grain in a mine dryer]. *APK Rossii* [Agroindustrial Complex of Russia], 2018, v. 25, no. 3, pp. 400–404.
- [16] Afon'kina V.A., Zakhkhatnov V.G., Mayorov V.I., Popov V.M. *K voprosu upravleniya protsessom kombinirovannoy sushki zerna* [On the issue of managing the process of combined grain drying]. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Bulletin of the Mordovian University], 2016, v. 26, no. 1, pp. 32–33. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201601.032-039
- [17] Zakhkhatnov V.G., Kashin P.V. *Opreделение nachal'noy vlazhnosti zerna pri sushke po vremeni ego nagreva* [Determination of the initial moisture content of grain during drying by its heating time]. *Vestnik VIESKh* [Bulletin of RESCH], 2018, no. 1(30), pp. 33–37.
- [18] Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. *Osobennosti teplomassoobmena pri sushke pilomaterialov besstupenchatymi rezhimami* [Features of heat and mass transfer during drying of sawn timber in stepless modes]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2019, v. 37, no. 2, pp. 139–143.
- [19] Epishkov E.N., Tkachev A.N., Bazhenova S.V. *Matematicheskaya model' raspredeleniya temperatury po poverkhnosti plenochnogo elektronagrevatelya s tokovedushchey chast'yu v vide lenty iz vysokoomnogo materiala* [Mathematical model of temperature distribution over the surface of a film electric heater with a current-carrying part in the form of a tape made of high-resistance material]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii v elektroenergetike i na transporte: zadachi, problemy, resheniya: sb. trudov VIVserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern equipment and technologies in electric power engineering and transport: tasks, problems, solutions: collection of works of the VI All-Russian (national) scientific and practical conference, Chelyabinsk, January 25, 2022. Chelyabinsk: South Ural Technological University, 2022, pp. 10–17.
- [20] Kosarin A.A. *Tekhnologiya impul'snoy sushki pilomaterialov* [Technology of pulse drying of sawn timber]. *Abstract Dis. Cand. Sci. (Tech.)*. Moscow, 2012.

- [21] Popov V.M., Afon'kina V.A., Shukshina E.I. *Sposob sushki drevesiny* [Method of drying wood]. Pat. № 2514576 RF, IPC F26B 3/34 F26B 3/353; applicant and patent holder of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy, No. 2012134370/06, application 08.10.2012, publ. 27.04.2014, bul. no. 12.
- [22] Epishkov N.E., Epishkov E.N., Glukhov S.V., Zverev A.L., Palamarchuk V.P. *Sposob sushki drevesiny* [Method of drying wood]. Pat. № 2367861 RF, IPC F26B 3/20, no. 2008111441/06, application. 03.24.2008, publ. 20.09.2009.
- [23] Kolobaeva A.A., Kotik O.A., Panina E.V., Chernyshova K.D. *Issledovanie kinetiki sushki rastitel'nogo syr'ya* [Investigation of the kinetics of drying vegetable raw materials]. *Tekhnologiya i tovarovedenie sel'skokhozyaystvennoy produktii* [Technology and commodity science of agricultural products], 2021, no. 2 (17), pp. 154–160.
- [24] Rudobashta S.P., Dorniyak O.R., Dmitriev V.M. *Raschet kinetiki sushki plastiny s uchetom ee usadki* [Calculation of the kinetics of plate drying taking into account its shrinkage]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2021, v. 55, no. 5, pp. 612–617. DOI: 10.31857/S004035712104014X
- [25] Izyakov F.Ya. *Planirovanie eksperimenta i obrabotka opytnykh dannykh* [Planning an experiment and processing experimental data]. Chelyabinsk: Chelyabinsk State Agrarian University, 2003, 103 p.
- [26] Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning an experiment in searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p.
- [27] Rudak O.G. *Issledovanie parametrov tekhnologii nachal'nogo progrevva drevesiny v nenasyshchennoy srede* [Investigation of the parameters of the technology of initial heating of wood in an unsaturated environment]. *Trudy BGTU. Ser. 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodnopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources], 2021, no. 2(246), pp. 268–276.
- [28] Protasov S.K., Matveyko N.P., Borovik A.A. *Issledovanie kinetiki sushki sloya kapillyarno-poristogo dispersnogo materiala* [Investigation of the kinetics of drying a layer of capillary-porous dispersed material]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2019, v. 96, no. 2, pp. 87–94.
- [29] Storodubtseva T.N., Tomilin A.I. *Issledovanie vodopogloshcheniya drevesiny listvennykh i khvoynnykh porod, rezul'taty ispytaniy* [Study of water absorption of deciduous and coniferous wood, test results]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2013, no. 5, pp. 331–336.
- [30] Artemov I.N. *Iskol'zovanie uravneniy regressii dlya vkhodyashchego i vykhodyashchego potoka sushil'nogo agenta dly aeksperimental'noy sushil'noy kamery kondensatsionnogo tipa* [Using regression equations for the incoming and outgoing flow of drying agent for an experimental condensation-type drying chamber]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2022, no. 2, pp. 152–154.
- [31] Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zueva G.A. *IK-sushka plastiny v nepreryvno deystvuyushchem elektromagnitnom pole* [IR-drying of a plate in a continuously acting electromagnetic field]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Engineering and Physics journal], 2022, v. 95, no. 2, pp. 364–372.
- [32] Zaripov Sh.G., Chizhov A.P., Kornienko V.A., Semenova N.I. *Vliyanie vodorastvorimykh veshchestv na raspredelenie vlazhnosti v listvennichnykh pilomaterialakh pered sushkoy* [Influence of water-soluble substances on the distribution of moisture in larch sawn timber before drying]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2019, no. 6 (372), pp. 185–193.
- [33] Mizonov V.E., Mitrofanov A.V., Tannous K., Ovchinnikov L.N. *Raschetno-eksperimental'noe issledovanie granulirovaniya v reaktore s kipyashchim sloem* [Calculation and experimental study of granulation in a fluidized bed reactor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series Chemistry and chemical technology], 2019, v. 62, no. 5, pp. 97–103.
- [34] Levinskiy V.N. Spectral analysis of various types of wood as the basis of low-temperature drying technology in vacuum conditions // 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. C. 05026.
- [35] Merkelov V.M., Romanov V.A., Mikheenko V.V. *Programma vybora koeffitsientov dlya rascheta teplovykh poter' cherez ograzhdeniya lesosushil'nykh kamer* [Program for selecting coefficients for calculating heat losses through the fences of timber drying chambers]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2014, no. 40, pp. 82–85.
- [36] Popov V.M., Afon'kina V.A., Shukshina E.I. *Sushka termolabil'nykh kul'tur v IK-diapazone s uchetom opticheskikh svoystv produkta* [Drying of thermolabile cultures in the IR range taking into account the optical properties of the product]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy], 2012, no. 37(296), pp. 90–92.

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>.

Authors' information

Levinskiy Vasiliy Nikolaevich ✉ — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, lv_74rus@mail.ru

Urazov Sergey Igorevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, eskaton@mail.ru

Afon'kina Valentina Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, afva82@mail.ru

Received 02.04.2024.

Approved after review 13.09.2024.

Accepted for publication 19.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest