

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 630*847.5

DOI: 10.53374/1993-0135-2025-4-50-55

Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XLIII, № 4. С. 50–55

ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИНФРАКРАСНО-ВАКУУМНОЙ СУШИЛКЕ*

В. Н. Левинский, Е. Н. Епишков

Южно-Уральский государственный аграрный университет
Российская Федерация, 457103, Челябинская область, г. Троицк, ул. им. Ю. А. Гагарина, 13
E-mail: lv_74rus@mail.ru

Аннотация. В статье приводится краткое описание решенных на сегодняшний день задач по согласованию спектральных характеристик пород древесины с оптическими свойствами генератора ИК-излучения, а также о теоретическом описании процесса инфракрасной сушки пиломатериала в условиях вакуумной камеры, на основе чего были произведены расчеты, проектирование и изготовление инфракрасно-вакуумной сушильной установки. Приводится описание технологии процесса сушки пиломатериалов в разработанной установке. Отмечается, что процесс сушки является мультифизическим (теплообмен излучением, конденсация влаги, степень разряжения, форм-факторное влияние и т. д.), поэтому для установления взаимосвязей на разработанной установке планируется проведение многофакторного эксперимента по отработке режимов для одной породы древесины с последующей их корректировке на другие породы. Для сокращения числа натуральных опытов на сегодняшний день существуют программные продукты математического моделирования позволяющие проводить исследования мультифизических процессов в сложных конструкциях, к которым в том числе относится разработанная установка. Целью исследования является в проверка адекватности математической модели процесса сушки пиломатериалов в инфракрасно-вакуумной сушильной установке. Проведен натуральный эксперимент по сушки досок древесины, для которых в течении всего процесса сушки получены температурные данные для разных точек внутри вакуумной камеры и снаружи. Далее в программном продукте математического моделирования была воспроизведена метрическая модель, учитывающая детали конструкции установки, технологического оборудования и особенности форм-факторного размещения пиломатериала. И для данной метрической модели произведены расчеты поля температур в зоне сушки пиломатериала. При сравнении полученных данных эксперимента и с применением программного продукта прослеживается идентичность параметров температуры пленочных электронагревателей, а также доказана температурная разница между нижним и верхним рядом уложенных досок. Откуда следует вывод об адекватности математической модели распределения температуры в инфракрасно-вакуумной сушилке.

Ключевые слова: математическая модель, сушилка, инфракрасный, вакуумный.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 50–55

ASSESSMENT OF THE ADEQUACY OF A MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN AN INFRARED VACUUM DRYER**

V. N. Levinsky, E. N. Epishkov

South Ural State Agrarian University
13, Gagarin St., Troitsk, Chelyabinsk Oblast, 457103, Russian Federation
E-mail: lv_74rus@mail.ru

Annotation. The article provides a brief description of the tasks solved to date to coordinate the spectral characteristics of wood species with the optical properties of an IR radiation generator, as well as a theoretical description of the process of infrared drying of lumber in a vacuum chamber, on the basis of which calculations, design

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

** **Acknowledgements.** The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>.

and manufacture of an infrared vacuum drying unit were performed. The technology of the lumber drying process in the developed installation is described. It is noted that the drying process is multiphysical (heat exchange by radiation, condensation of moisture, degree of dilution, form factor effect, etc.), therefore, in order to establish relationships at the developed installation, it is planned to conduct a multifactorial experiment to work out the modes for one type of wood and then adjust them to other species. To reduce the number of natural experiments, there are currently mathematical modeling software products that allow conducting research on multiphysical processes in complex structures, including the developed installation. The purpose of the study is to verify the adequacy of the mathematical model of the lumber drying process in an infrared vacuum drying unit. A natural experiment was conducted on drying wood planks, for which temperature data was obtained for different points inside and outside the vacuum chamber during the entire drying process. Further, a metric model was reproduced in the mathematical modeling software product, considering the details of the installation design, technological equipment, and features of the form factor placement of lumber. And for this metric model, calculations of the temperature field in the lumber drying zone were performed. When comparing the experimental data obtained and using the software product, the identity of the temperature parameters of the film electric heaters is traced, and the temperature difference between the lower and upper rows of stacked boards is proved. The conclusion is that the mathematical model of temperature distribution in an infrared vacuum dryer is correct.

Keywords: mathematical model, dryer, infrared, vacuum.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день получены спектральные характеристики наиболее распространенных для переработки пород древесины, в которых особый интерес представляют экстремумы в диапазоне 9,4–9,7 мкм, так как в нем поглощение излучения 100 % [1]. При этих данных селективную работу системы «излучатель-приемник» возможно организовать с применением гибкого пленочного электронагревателя, это следует из его технических характеристик и дополнительных исследований, в которых установлена зависимость температуры поверхности ИК-излучателя от температуры окружающего пространства и его удельной мощности [2]. Проведены теоретические изыскания температурного воздействия и электромагнитного поля на пиломатериал в условиях разряженной среды, а также особенности расчёта конструкции вакуумной камеры, подбора технологического оборудования и системы автоматического управления (САУ) [3–6].

На основе исследований упомянутых выше произведены расчеты, проектирование и изготовление инфракрасно-вакуумной сушильной установки (рис. 1, табл. 1).



Рис. 1. Инфракрасно-вакуумная сушильная установка

Предполагается, что процессы сушки пиломатериала (досок), уложенного в штабель с промежуточ-

ными кассетами (каркас из реек с закрепленными пленочными электронагревателями), будет происходить в условиях замкнутого пространства герметичной камеры в разряженной среде. Поэтому для расчета ее конструктивных параметров прежде всего рассматривалась теория: физических процессов теплообмена излучением между гибким пленочным электронагревателем и высушиваемым пиломатериалом; уровень разряжения внутри камеры в разных периодах сушки [4]; конденсация влаги на охлаждающей поверхности; переходные процессы (например, переход от атмосферного давления к разряженному или нагрев пиломатериала до заданной температуры) [3; 7].

В совокупности процесс мультифизический. Основные процессы происходят в замкнутом пространстве и их степень влияния друг на друга очевидна, но требует более глубокого изучения. Для установления взаимосвязей на разработанной установке планируется проведение экспериментов по отработке и корректировке режимов для одной породы древесины.

Параллельно этому с применением программным обеспечением будет разрабатываться математическая модель, учитывающая все возможные варианты изменения параметров разряженной среды и высушиваемого пиломатериала в камере. Математическое описание в виде системы дифференциальных и алгебраических уравнений будет определяться аналитически на основе законов физики и эмпирически на основе получаемых кинетических кривых сушки пиломатериалов [8; 9].

Цель исследования заключается в проверке адекватности математической модели процесса сушки пиломатериалов в инфракрасно-вакуумной сушильной установке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

План экспериментов подразумевает, в том числе разный способ укладки пиломатериала между щитами с пленочными электронагревателями, измененные габаритные размеры пиломатериалов. На рис. 2 показан вариант размещения 1 м³ досок толщиной 50 мм, шириной 150 мм и длиной 4 м.

Таблица 1
Технические характеристики инфракрасно-вакуумной сушильной установки

№ п/п	Наименование	Значение
1	Параметры питающей сети	380 В, 50 Гц
2	Установленная мощность установки (суммарная мощность пленочных электронагревателей, циркуляционного и вакуумного насосов, приборов КИПиА)	7 кВт
3	Габаритные размеры установки	4630×1820×1410 мм
4	Внутренний размер рабочей камеры	4550×1210×970 мм
	Габаритный размер щита с пленочными электронагревателями	1000×4000 мм
5	Наибольшая длина пиломатериала	4,2 м
	Объем загрузки пиломатериала	до 1 м ³
6	Максимально допустимая температура нагрева пленочного электронагревателя	до +95 °С
	Значения рабочего вакуума	-0,1...0 МПа
7	Рекомендованное давление в системе циркуляции охлаждающей жидкости	0,06...0,15 МПа

Используя справочные данные из проектной документации, разработанная в рамках реализации гранта РНФ (Соглашение № 23-76-01090) инфракрасно-вакуумной сушильной установки, разработана метрическая модель непосредственно на программном продукте.

Система уравнений, описывающих конвективное течение воздуха в зоне сушки, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial u} \right) &= \nabla \left[-P_I + \frac{\partial \vec{V}}{\partial k} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial F} + \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial g} \right] \\
 \nabla \left(\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial u} \right) &= 0 \\
 \frac{\partial \vec{V}}{\partial k} &= (\mu + \mu_T) * \left(\nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial u} + \left(\nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial u} \right)^T \right) - \\
 &- \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) * \left(\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial u} \right) - \frac{2}{3} * \rho * k * \frac{\partial \vec{V}}{\partial I} \\
 \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial u} \right)_k &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial k} \right] + P_k - \rho * \varepsilon \quad (1) \\
 \rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial u} \right)_\varepsilon &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial \varepsilon} \right] + \\
 &+ C_{\varepsilon 1} * \frac{\varepsilon}{k} * P_k - C_{\varepsilon 2} * \frac{\varepsilon^2}{k} * \rho, \quad \varepsilon = e * p \\
 \mu_T &= \rho * C_\mu * \frac{k^2}{\varepsilon} \\
 P_k &= \mu_T * \left[\nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial u} : \left(\nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial u} + \left(\nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial u} \right)^T \right) - \frac{2}{3} * \left(\nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial u} \right)^2 \right] - \\
 &- \frac{2}{3} * \rho * k * \nabla \frac{\partial \vec{V}}{\partial u},
 \end{aligned}$$

где k – плотность турбулентной кинетической энергии; \vec{V} – вектор скорости воздуха; ε – диссипация турбулентной кинетической энергии; g – ускорение свободного падения; F – плотность массовых сил; ρ – давление; P_k – скорость производства турбулентной энергии течением; $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – коэффициенты модели турбулентности; $\frac{\partial \vec{V}}{\partial I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ –

единичный тензор; μ – коэффициент динамической вязкости; ∇ – оператор Набла.

Уравнение теплопередачи с учётом гравитационной конвекции в зоне сушки.

$$\begin{aligned}
 \rho * C_p * \nabla T + \nabla \cdot q &= Q \\
 \nabla \cdot q &= -\lambda * \nabla T,
 \end{aligned} \quad (2)$$

где C_p – теплоёмкость среды при постоянном давлении; λ – коэффициент теплопроводности среды; q – тепловой поток, обусловленный теплопроводностью; T – температура среды; Q – плотность мощности источников тепла.

Система уравнений, описывающая теплообмен излучением между непрозрачными поверхностями, подчинена закону Стефана–Больцмана:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} * \sigma * (T_1^4 - T_2^4), \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведённая степень черноты поверхностей участвующих в теплообмене; $\sigma = 5,67 * 10^{-8}$ (Вт*К⁴)/м² – постоянная Стефана–Больцмана.

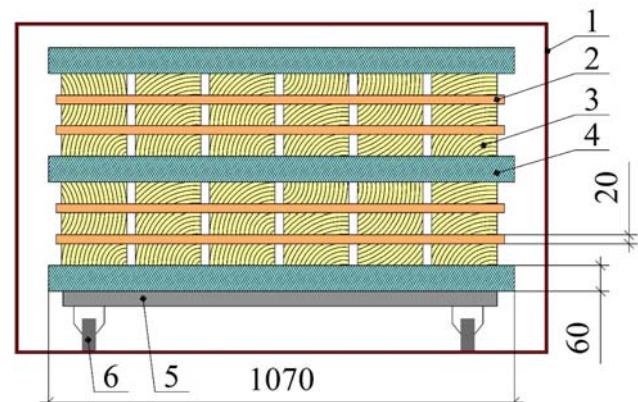


Рис. 2. Размещение досок в инфракрасно-вакуумной сушильной установке:
1 – корпус камеры; 2 – поперечные прокладки; 3 – доска; 4 – кассеты с пленочными электронагревателями (1, 2, 3 – порядок счета снизу вверх); 5 – подвижная платформа для укладки штабеля; 6 – колеса для выгрузки подвижной платформы из камеры

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения эксперимента в сушильную установку была загружена партия досок сосны с габаритными параметрами и по принципу укладки, показанному на рис. 2. 50×100 мм и длиной 4 м. С применением разработанной САУ (с функцией записи параметров процесса в режиме реального времени) получены кривые сушки (рис. 3) [6]. Длительность процесса сушки составила 54 часа, доски были получены влажностью в разбросе 12–14 %. Затраты электрической энергии на сушку составили 88 кВт·ч. Управление процессом сушки осуществлялось по температуре доски. Температура устанавливалась на уровне 50°C (гистерезис 1°C). Разряжение в камере соответствовало уровню $-0,07$ МПа.

Анализ эмпирических кривых показывает, что максимум температуры поверхности кассеты с пленочными электронагревателями № 3 соответствует $94,1^{\circ}\text{C}$, кассеты № 2 нагрелась до $78,8^{\circ}\text{C}$. Максимум температуры среды в камере соответствуют 35°C и она коррелируется со значениями температуры в доске, которая соответствует заданному уровню управления процессом сушки, но разница между кривыми 3 и 4 (рис. 3) составляет $5\text{--}7^{\circ}\text{C}$. Стоит отметить, что нижний ряд досок был холоднее на величину этой разницы. Температура воздуха в помещении, где установлена камера за весь процесс не превышала 16°C .

Современные программные продукты математического моделирования (COMSOL Multiphysics,

MATLAB Simulink, SimInTech и др.), позволяют проводить исследования мультифизических процессов в сложных конструкциях, к которым в том числе относится разрабатываемая инфракрасно-вакуумная сушильная установка для древесины [10–14].

Используя справочные данные разработанной конструкторской документации и выбранного технологического оборудования, разработана геометрическая модель непосредственно в программе математического моделирования, для которой произведены расчеты поля температур в зоне сушки пиломатериала (рис. 4).

Расчеты выполнены при атмосферном давлении в камере 0,3 атм. и температуре наружного воздуха 15°C . Плотность мощности нагревательного элемента составил $370 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в режиме включение – 15 минут, 35 минут – пауза.

Для наглядной демонстрации распределения температуры в числовом формате, выделим направление (красная прямая рис. 5, a), вдоль которого исследуем изменение температуры и непосредственно распределение температуры вдоль данной прямой (рис. 5, б).

Анализ полученных зависимостей с применением программного продукта моделирования процесса сушки древесины показал, что температура поверхности 3-х пленочных электронагревателей составила $83,5$; 82 ; и 94°C ; температура нижнего ряда досок до 29°C , а верхнего до 44°C .

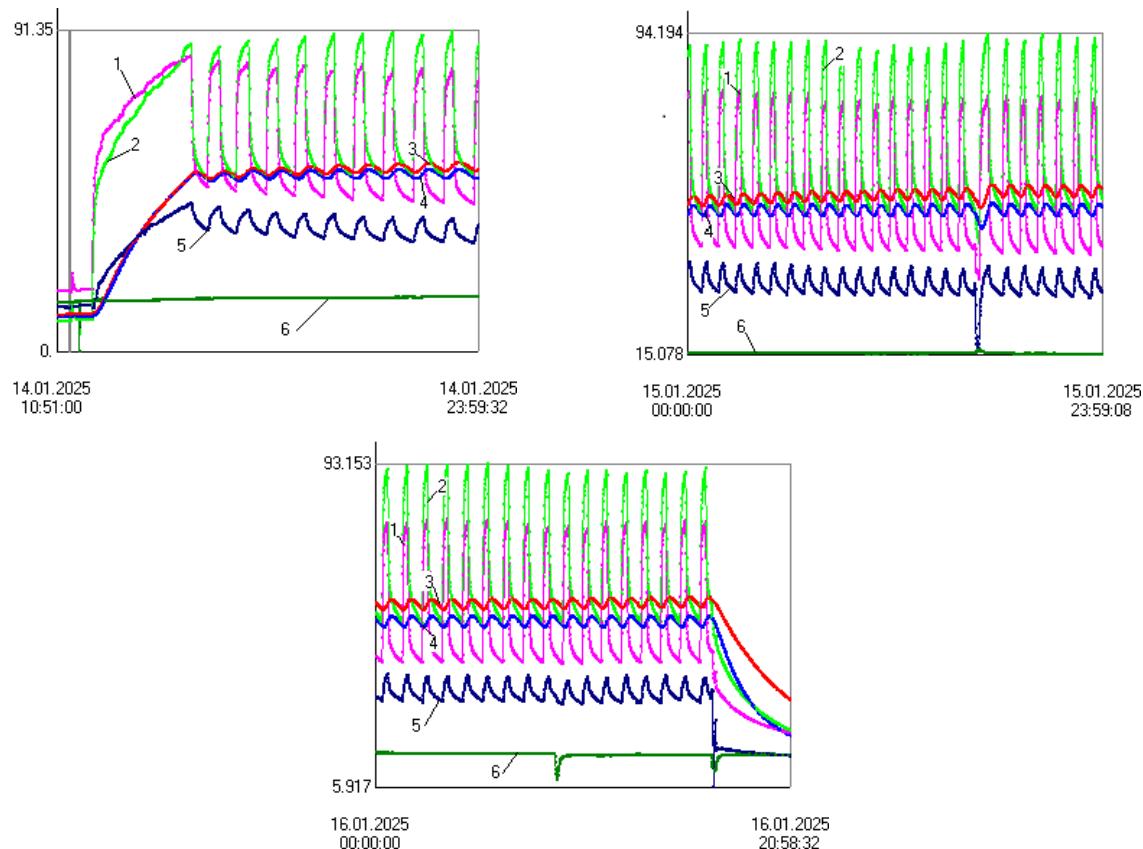


Рис. 3. Эмпирические кривые сушки сосновых досок:

1 – температура поверхности пленочного электронагревателя (кассеты № 3); 2 – температура поверхности пленочного электронагревателя (кассеты № 2); 3 – температура в доске (между кассетами № 2 и № 3); 4 – температура в доске (между кассетами № 1 и № 2); 5 – температура среды в камере; 6 – температура воздуха в помещении, где установлена камера

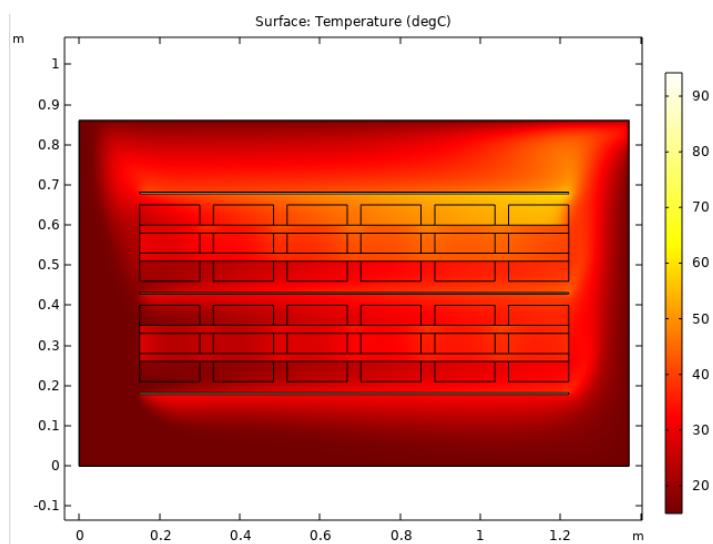


Рис. 4. Поле температур в зоне сушки пиломатериала

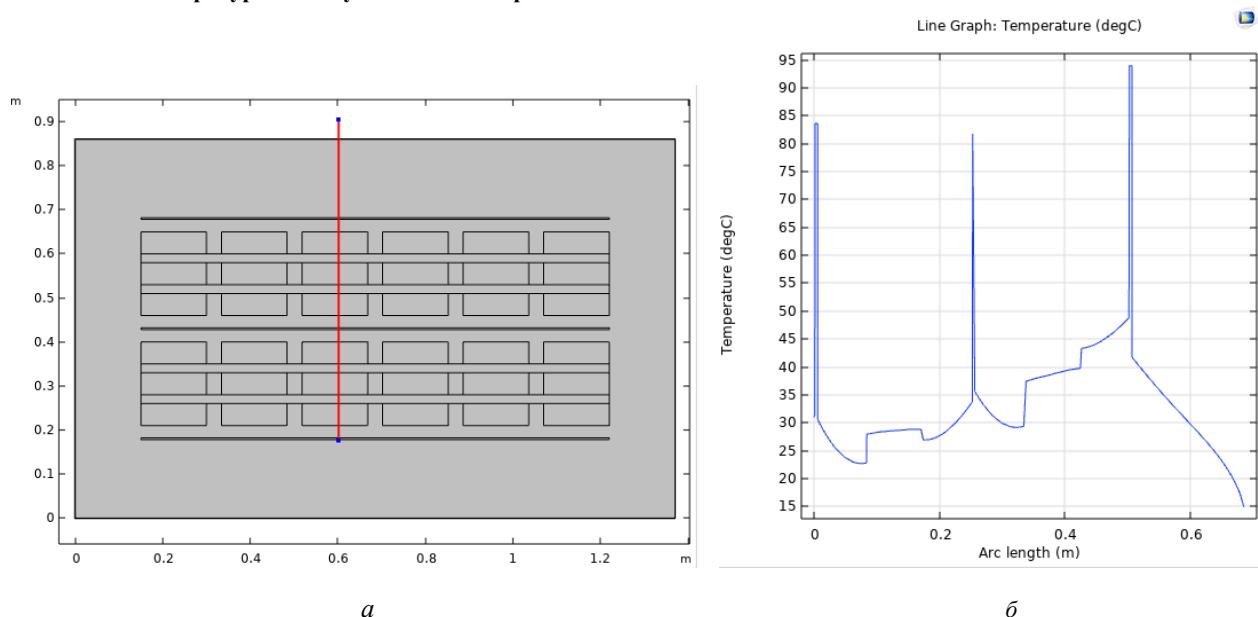


Рис. 5. Распределение температуры в числовом формате уложенного пиломатериала с кассетами пленочных в вакуумной камере:

а – прямая вдоль которой исследуется поле температур; б – распределение температуры вдоль выделенной прямой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставляя данные эксперимента и данные полученные с применением программного продукта, следует вывод об адекватности математической модели распределения температуры в инфракрасновакуумной сушилке, так как прослеживается идентичность параметров температуры пленочных электронагревателей, а также доказана температурная разница между нижним и верхним рядом уложенных досок. Однако, требуется больше информации о скорости нагрева древесины и набор производственной статистики для уточнения и минимизации ошибки, так как реальный нагрев происходил скорее, чем при теоретическом моделировании.

Полученная модель позволит провести ряд виртуальных испытаний, по которым можно исследовать различные режимы работы элементов сушильной установки и объекта сушки, оптимизировать алгоритмы

управления и в последующем создавать из полученных алгоритмов программы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. 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), Moscow, 05–06 декабря 2023 года. Vol. 82. Les Ulis, 2024. P. 05026. DOI 10.1051/bioconf/20248205026.

2. Исследование влияния температуры окружающей среды на параметры пленочного электронагревателя / В. Н. Левинский, В. М. Попов, Е. Н. Епишков, В. А. Афонькина // Аграрный научный журнал. 2024. № 7. С. 110–116. DOI 10.28983/asj.y2024i7 pp110-116.

3. Шагеева А. И., Кайнов П. А., Сафин Р. Р. Разработка эффективной схемы энергообеспечения процесса вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 3. С. 28–34.
4. Мухаметзянов Ш. Р., Сафин Р. Р., Кайнов П. А. Повышение энергоэффективной осциллирующей вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов : монография / Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. Технол. ун-т. Казань : Изд-во КНИТУ, 2019. 120 с.
5. Дунаев М. П., Дунаев А. М. Разработка автоматизированной системы научных исследований для изучения технологического процесса сушки древесины // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2019. Т. 1. С. 132–133.
6. Левинский В. Н. Повышение эффективности процесса ИК-сушки пиломатериалов за счет адаптивности работы САУ // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 4(142). DOI 10.23670/IRJ.2024.142.131.
7. Levinskiy V. N. Justification of the effective distribution of energy emitted by a film electric heater on stacked lumber // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 108. P. 20001. DOI 10.1051/bioconf/202410820001.
8. 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. 2019. № 2(50). С. 82–88.
9. 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. Vol. 62, № 12. 2019. P. 94–100.
10. Калачев Ю. Н., Онищенко Г. Б. Системы управления и моделирование электропривода. М. : ДМК Пресс, 2022. 154 с.
11. Верификация модуля расчета гидравлики в SIMINTECH / Е. А. Лисина, А. М. Самойлов, Н. П. Тарасова, В. В. Андреев // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 12. С. 148–151.
12. Захахатнов В. Г., Белов А. В. Моделирование дифференциальной защиты трансформатора в среде MatLab // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, № 1(46). С. 19–25. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-19-25.
13. Оськин С. В. Моделирование аэродинамики в асинхронном электродвигателе // АПК России. 2023. Т. 30, № 1. С. 47–52. DOI 10.55934/2587-8824-2023-30-1-47-52.
14. Оськин С. В., Овсянников Д. А. Моделирование теплофизических процессов в пчелином улье с электроподогревом // Биофизика. 2020. Т. 65, № 2. С. 381–389. DOI 10.31857/S0006302920010222.
- Economy – 2023» (MSNBAS2023), Moscow, 05–06 dekabrya 2023 goda. Vol. 82. Les Ulis, 2024. P. 05026. DOI 10.1051/bioconf/20248205026.
2. Levinskiy V. N., Popov V. M., Epishkov E. N., Afon'kina V. A. Issledovanie vliyaniya temperatury okruzhayushchej sredy na parametry plenochnogo elektronagrevatelya // Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2024. № 7. S. 110–116. DOI 10.28983/asj.y2024i7pp110-116.
3. Shageeva A. I., Kajnov P. A., Safin R. R. Razrabotka effektivnoj skhemy energoobespecheniya processa vakuumnoj SVCh sushki pilomaterialov // Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'. 2022. № 3. S. 28–34.
4. Muhametzyanov Sh. R., Safin R. R., Kajnov P. A. Povyshenie energoeffektivnoj oscilliruyushchej vakuumno-konduktivnoj sushki pilomaterialov : monografiya / Minobrnauki Rossii, Kazan. nac. issled. tekhnol. un-t. Kazan' : Izd-vo KNITU, 2019. 120 s.
5. Dunaev M. P., Dunaev A. M. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy nauchnyh issledovanij dlya izuchenija tekhnologicheskogo processa sushki drevesiny // Sovremennye tekhnologii i nauchno-tehnicheskij progress. 2019. Т. 1. С. 132–133.
6. Levinskiy V. N. Povyshenie effektivnosti processa IK-sushki pilomaterialov za schet adaptivnosti raboty SAU // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2024. № 4(142). DOI 10.23670/IRJ.2024.142.131.
7. Levinskiy V. N. Justification of the effective distribution of energy emitted by a film electric heater on stacked lumber // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 108. P. 20001. DOI 10.1051/bioconf/202410820001.
8. Matematicheskaya model' processa sushki pilomaterialov pri diskretnom raspolozhenii istochnikov SVCh-energii / R. S. Aipov, M. I. Tuhvatullin, R. B. Yarullin [i dr.] // Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. № 2(50). 2019. S. 82–88.
9. 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.
10. Kalachev Yu. N., Onishchenko G. B. Sistemy upravleniya i modelirovaniye elektroprivoda. M. : DMK Press, 2022. 154 s.
11. Verifikasiya modulya rascheta gidravliki v SIMINTECH / E. A. Lisina, A. M. Samojlov, N. P. Tarasova, V. V. Andreev // Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya. 2024. № 12. S. 148–151.
12. Zahahatnov V. G., Belov A. V. Modelirovaniye differencial'noj zashchity transformatora v srede MatLab // Elektrotehnologii i elektrooborudovanie v APK. 2022. Т. 69, № 1(46). С. 19–25. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-1-19-25.
13. Os'kin S. V. Modelirovaniye aerodinamiki v asinhronnom elektrodvigatеле // APK Rossii. 2023. Т. 30, № 1. С. 47–52. DOI 10.55934/2587-8824-2023-30-1-47-52.
14. Os'kin S. V., Ovsyannikov D. A. Modelirovaniye teplofizicheskikh processov v pchelinom ul'e s elektro-podogrevom // Biofizika. 2020. Т. 65, № 2. С. 381–389. DOI 10.31857/S0006302920010222.

REFERENCES

1. 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

© Левинский В. Н., Епишков Е. Н., 2025