



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СУШКИ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ

А.Н. Качанов¹, Д.А. Коренков¹, А.А. Ревков¹, В.В. Максимов², О.В. Воркунов²,

¹Орловский государственный технический университет имени И.С. Тургенева,
г. Орёл, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9164-8942>, kan@ostu.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Длительность срока эксплуатации деревянных опор, применяемых на линиях электропередач напряжением до 35 кВ, зависит от качества проведения сушки и последующей пропитки пиломатериала. Сушка заготовок опор в настоящее время осуществляется атмосферным или конвективным способами и является наиболее продолжительным и одним из энергозатратных этапов их производства. В то же время, существуют перспективные электротехнологические сушильные установки, позволяющие сократить длительность и повысить качество процесса при сопоставимых удельных энергозатратах. К таким установкам следует отнести вакуумные высокочастотные комплексы, широкое внедрение которых осложнено рядом нерешенных научно-технических задач: оптимизацией процесса вакуумно-высокочастотной сушки и обеспечением равномерности электромагнитного поля в заготовках большой длины. Целью данной статьи является получение математического инструментария, позволяющего одновременно описать перекрестное влияние электромагнитных явлений и процессов теплопереноса в длинномерном пиломатериале и способствующего дальнейшему решению указанных проблем. МЕТОДЫ. Использованы положения теории электромагнитного поля, теплопереноса и теплообмена, методы математического моделирования, учтены результаты ранее проведенных исследований в области распределения электромагнитного поля в поперечном и продольном сечениях загрузки рабочей камеры. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получена одномерная математическая модель, отражающая влияние волнового характера распределения параметров электромагнитного поля по длине заготовок опор и параметров внешней среды на температуру и влагосодержание материала, отличающаяся возможностью применения простых алгоритмов анализа систем дифференциальных уравнений на основе метода конечных разностей и требующая меньшего количества исходных данных о свойствах высушиваемого материала. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты численного исследования с помощью предложенных модели и методики ее анализа сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными, на основе чего сделан вывод об адекватности и большей её эффективности, по сравнению с другими существующими моделями вакуумно-высокочастотной сушки. Дальнейшее использование представленного математического аппарата для оптимизации конструкции и режимов вакуумных высокочастотных комплексов под задачи сушки заготовок деревянных опор позволит в целом повысить надежность воздушных линий электропередач.

Ключевые слова: Сушка деревянных опор, сушка в электромагнитном поле, сушка в вакууме, электротехнологические установки для сушки, повышение надежности ВЛЭП, энерго- и ресурсосберегающие технологии.

Для цитирования: Качанов А.Н., Коренков Д.А., Ревков А.А., Максимов В.В., Воркунов О.В. Моделирование процессов высокочастотной сушки деревянных опор в вакуумной камере // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 130-142. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-130-142.

WORDS HIGH-FREQUENCY DRYING PROCESSES SIMULATION OF WOODEN TANGENT TOWERS IN A VACUUM CHAMBER

AN. Kachanov¹, DA. Korenkov¹, AA. Revkov¹, VV. Maksimov², OV. Vorkunov²

¹Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9164-8942>, kan@ostu.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* The service life duration of wooden tangent towers used on overhead transmission lines with a voltage of up to 35 kV depends on the quality of lumber drying and subsequent impregnation. The drying of tangent tower workpieces is currently carried out by atmospheric or convective methods and is the longest and one of the energy-consuming stages of their production. At the same time, there are promising electrotechnological drying installations that can reduce the duration and improve drying quality at comparable specific energy costs. Such installations include vacuum high-frequency complexes, the wide introduction of which is complicated by a number of unresolved scientific and technical problems like optimizing vacuum high-frequency drying modes and ensuring electromagnetic field uniformity in long workpieces. The purpose of this article is to obtain mathematical tools that simultaneously describe the cross-effects of electromagnetic phenomena and heat and mass transfer processes in long-sized lumber and contribute to the further solution of these problems. *METHODS.* The positions of the theory of electromagnetic field, heat mass transfer and heat mass exchange, methods of mathematical modeling were used for this purpose. Also the results of previous studies of electromagnetic field distribution in the cross-section and longitudinal sections of the working chamber loading are taken into account. *RESULTS.* A one-dimensional mathematical model is obtained. It describes the influence of electromagnetic wave distribution along the length of tangent towers and external medium parameters on the temperature and moisture content in the material. This model is characterized by the possibility of using simple algorithms for analyzing differential equation systems based on the finite difference method and requiring less initial data on the drying material properties. *CONCLUSION.* The obtained by using the proposed model and the method of its analysis the numerical study results are compared with the available experimental data. Based on this comparison it is concluded that the obtained model is adequate and more effective relative to other existing models of vacuum-high-frequency drying. Generally, further use of the presented mathematical toolkit to optimize the design and modes of vacuum high-frequency complexes in the task of drying wooden tangent towers will increase the reliability of overhead transmission lines.

Keywords: Drying of wooden tangent towers, drying in electromagnetic field, vacuum drying, electrotechnological installations for drying, increasing the reliability of overhead transmission lines, energy and resource saving technologies.

For citation: Kachanov AN, Korenkov DA, Revkov AA, Maksimov VV, Vorkunov OV. Words high-frequency drying processes simulation of wooden tangent towers in a vacuum chamber. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):130-142. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-130-142.

Введение

Несмотря на то, что конструкции и материалы для изготовления опор постоянно совершенствуются, о чём свидетельствуют непрекращающиеся исследования в этой области [1, 2], практический интерес к деревянным опорам не снижается. Исторически первыми опорами воздушных линий электропередач были именно деревянные. Низкая стоимость, доступность, достаточная механическая прочность и экологичность сырьевого материала стали причиной их широкого распространения, и впоследствии они стали применяться в распределительных сетях как низкого, так и высокого уровней напряжения. При производстве опор ЛЭП в качестве сырья используются заготовки мягких лиственных пород (береза, осина, ольха) длиной не более 8 м и хвойных пород (сосна, ель) длиной не более 12 м [3]. Технологии модификации древесины позволили поднять относительно низкие физико-механические свойства дешевых пород до уровня твердых лиственных пород, благодаря этому область применения деревянных опор сейчас ограничена уровнем напряжения 110 кВ, хотя, фактически, ввиду конструктивных

соображений они эксплуатируются на линиях не выше 35 кВ. Однако не только механическая прочность является критерием выбора материала опор, но также и долговечность, которая характеризуется нормативным сроком эксплуатации. Последний для деревянных пропитанных опор составляет 25 лет, для железобетонных – 40 лет, для металлических – 50 лет. Современные технологии модификации древесины в среднем позволяют приблизить срок службы к уровню железобетонных опор [3], но пока реализован не весь их потенциал. Очевидно, что дальнейшие научно-технические разработки в этой области должны быть сосредоточены на достижении следующей «психологической отметки» 50 лет.

Различные способы модификации древесины подразумевают проведение ряда технологических операций, например, пропитки специальными составами, выдержку в вакууме, прессования и других. При этом общим для всех способов является этап сушки, при котором из межклеточного пространства удаляется свободная влага, и освобождается место для модифицирующей жидкости. Качество сушки определяется множеством параметров, в том числе, конечным влагосодержанием, равномерностью влагосодержания по сечению и длине заготовки опоры и количеством образовавшихся в этом процессе дефектов. Равномерность сушки определяет то, насколько однородно будет выполнена последующая пропитка древесины. Основной вид дефектов при сушке оцилиндрованных заготовок – это растрескивания, чем их больше, и чем они глубже, тем сильнее будут взаимодействовать внутренние слои древесины с негативными атмосферными факторами. Таким образом, сушка – это ответственный этап производства деревянных опор ЛЭП, который во многом определяет качество проведения последующих операций, а, следовательно, влияет на срок эксплуатации конечной продукции.

В большинстве случаев заготовки опор высушиваются конвективными способами [4]: атмосферным или камерным. Конечное влагосодержание составляет при этом 0,28 кг/кг. Недостаток атмосферной сушки заключается в ее сезонности. Такая сушка возможна только в летний период и длится около трех месяцев, но не требует дополнительных затрат энергии, а получаемое при этом растрескивание считается эталонным. Камерная сушка позволяет сократить длительность процесса до недели и осуществляется в специальных установках, в которых тепловая энергия подводится к заготовкам посредством агента сушки – нагретого воздуха или пара. На входе в камеру воздух увлажняется, чтобы предотвратить чрезмерное высыхание поверхности древесины. В противном случае образуется недопустимый градиент влагосодержания, приводящий к чрезмерным дефектам сушки. При прохождении через штабель агент сушки насыщается влагой, после чего утилизируется в атмосферу вместе с тепловой энергией. Это обуславливает низкую энергетическую эффективность такого оборудования. Меньшее распространение получил способ сушки в специальных автоклавах под вакуумом. Длительность такого способа сопоставима с конвективным камерным, но удельные энергозатраты оказываются больше. Вместе с тем, уже существуют перспективные научно-технические разработки, позволяющие снизить длительность сушки при сопоставимых или меньших затратах энергии и основанные на диэлектрическом нагреве [5-7].

Первые камеры для высокочастотной диэлектрической сушки появились в середине прошлого века. В том виде технология сушки себя не зарекомендовала, поэтому на смену ей пришли комбинированные технологии: конвективно-диэлектрическая и вакуумно-диэлектрическая. Последняя обладает рядом преимуществ, не доступным для конвективного, диэлектрического и вакуумного способа по отдельности. Сушка осуществляется в газопаровой смеси низкого давления, в связи с этим устраняется большой градиент влагосодержания по сечению материала. Одновременно снижается температура кипения влаги, поэтому высокочастотный нагрев проводится не более чем до 80 °С, что означает пониженные тепловые потери через стенки камеры и сохранение механических свойств материала. Среди преимуществ также следует отметить высокую скорость сушки, которая до 10 раз выше, чем скорость камерной сушки. При сопоставимых объемах загрузки вакуумно-высокочастотной и конвективной камер за счет высокой производительности первая способствует снижению себестоимости сушки 1 м³ пиломатериалов [8].

Вместе с тем остается ряд нерешенных вопросов, затрудняющих эффективное использование вакуумно-высокочастотной технологии для сушки не только заготовок деревянных опор, но и других длинномерных изделий из этого материала. Во-первых, существующее высокочастотное оборудование требует большого расхода

электроэнергии. Это приводит к снижению конкурентоспособности таких камер по сравнению с конвективными, объем загрузки которых в несколько раз больше. В целом использование вакуумно-высокочастотной технологии сушки на текущем этапе её развития рекомендуется для пиломатериалов толстых сечений (в том числе заготовок опор), ценных пород и пород с большой плотностью. Во-вторых, размещение заготовок большой длины в существующих конструкциях высокочастотных камер неизбежно сопровождается неравномерным распределением электромагнитных полей, что, в итоге, приводит к неравномерности сушки. В третьих, требуется доработка технологических режимов сушки пиломатериалов большого сечения. Все отмеченное ставит задачу проведения дальнейших теоретических исследований в данной области с целью совершенствования рассматриваемого способа. Для этого необходимы математические модели, адекватно описывающие процессы, протекающие в камере и материале большой длины. Получение такого математического аппарата является целью данного исследования, а его актуальность не вызывает сомнений, поскольку оно направлено на устранение указанных ограничений использования вакуумно-высокочастотной сушки для заготовок деревянных опор ЛЭП. Успешное преодоление ограничений позволит добиться положительных энергосберегающего и экономического эффектов за счет сокращения продолжительностей сушки и цикла производства опор ЛЭП в целом. Дополнительный положительный эффект заключается в обеспечении высокого качества сушки, необходимого для достижения длительного срока их эксплуатации.

В наиболее общем виде их структурная схема вакуумно-высокочастотных камер показана на рис. 1.

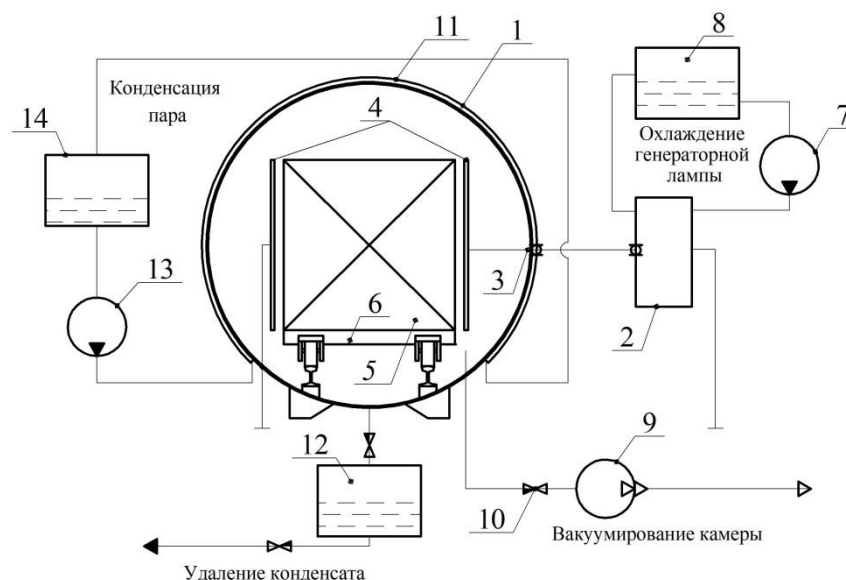


Рис. 1. Структурная схема вакуумно-высокочастотной камеры

1 – рабочая камера; 2 – ВЧ генератор; 3 – ВЧ токопровод; 4 – обкладки рабочего конденсатора; 5 – штабель пиломатериала; 6 – подштабельная тележка; 7 – вакуумный насос; 8 – обратный клапан; 9 – охлаждающая рубашка; 10 – сборник конденсата; 11 – циркуляционный насос системы конденсации пара; 12 – резервуар с холодной водой

Корпус рабочей камеры 1 объемом V представляет собой металлическую оболочку, обычно цилиндрической формы. Как можно ближе к ней устанавливается ВЧ генератор 2, подающий по высокочастотным фидерам 3 напряжение U частотой f на обкладки 4 рабочего конденсатора. Между обкладками располагается высушиваемый материал 5 на подштабельной тележке 6.

После включения генератора под действием релаксационно-поляризационных явлений и диэлектрических потерь в материале образуются внутренние источники теплоты Q_v , и температура T его внутренних зон стремительно увеличивается, образуется градиент температуры $\text{grad } T$, направленный внутрь материала. В материале начинает интенсивно испаряться влага, парциальное давление пара становится больше давления окружающей среды $P_{\text{ср}}$ в камере, которое перед началом сушки понижается вакуумным насосом 7. После его отключения натекание газа предотвращается обратным клапаном 8. Благодаря капиллярно-пористому строению древесины возле её

поверхности давление релаксируется, так возникает градиент избыточного давления $\overline{\text{grad } P}$, направленный к внутренним зонам. Под действием градиентов температуры и давления создаются термодиффузионный и фильтрационный потоки влаги к поверхности. Из-за испарения влагосодержание u во внутренних зонах оказывается меньше, чем в поверхностных. Так появляется градиент влагосодержания и соответствующий диффузионный поток влаги $\overline{\text{grad } u}$, направленный вглубь материала и препятствующий удалению влаги из него. Фильтрационный механизм переноса парообразной влаги к поверхности является преобладающим и объясняет высокую интенсивность вакуумно-высокочастотной сушки [9, 10].

Перемещенная под действием механизмов термо- и фильтрационной диффузии к поверхности влага испаряется в окружающее пространство, а затем конденсируется на стенках рабочей камеры и стекает в сборник конденсата 10. Для обеспечения этого процесса предусматривается система конденсации пара, состоящая из окружающей рабочую камеру охлаждающей рубашки 9, по которой за счет насоса 11 непрерывно циркулирует охлаждающая жидкость, подаваемая из резервуара 12.

Таким образом, вакуумно-высокочастотная сушка представляет собой совокупность сложных электрофизических, термодинамических и процессов тепломассопереноса и тепломассообмена.

Во многих отечественных [11] и зарубежных исследованиях [12] для описания совокупности процессов тепло- и массопереноса внутри материала, протекающих под действием термодиффузионного, концентрационного и фильтрационного механизмов переноса влаги используется система уравнений Лыкова:

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a_t \nabla^2 T + \frac{\xi \cdot r}{c} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{Q_v}{c \cdot \rho_0} \\ \frac{\partial u}{\partial t} = a_m \delta \nabla^2 T + a_m \nabla^2 u + \xi \frac{\partial u}{\partial t}, \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\xi}{c_v} \frac{\partial u}{\partial t} + a_p \nabla^2 P \end{cases}, \quad (1)$$

где a_t – коэффициент температуропроводности, м²/сек; ξ – критерий фазового превращения; r – удельная теплота испарения влаги, Дж/кг; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·°C); ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³; a_m – коэффициент влагопроводности (диффузии влаги), м²/сек; δ – относительный коэффициент термодиффузии влаги, кг/(кг·°C); c_v – паромкость материала, 1/Па; a_p – коэффициент конвективной фильтрационной диффузии, м²/сек.

Трудность, с которой приходится сталкиваться при использовании полной системы (1), заключается в необходимости наличия сведений о тепло-, влаго- и паропроводящих свойствах исследуемого материала. Соответствующие коэффициенты сложным образом зависят от его температуры, влагосодержания, внутреннего давления, направления волокон и других факторов, многие взаимосвязи еще вовсе не изучены, либо информация о них ограничена или противоречива. Организация численного решения системы (1) даже в двухмерной постановке достаточно сложна и ввиду отсутствия полных данных о функциональных взаимосвязях коэффициентов a_t , a_m , a_p и δ с параметрами T , u , P в разных направлениях волокон древесины не приводит к точному результату. Это заставляет исследователей различными способами упрощать систему (1), сводя ее к двум уравнениям за счет использования эффективных коэффициентов или решать в одномерной постановке [13]. Попытки моделирования тепломассопереноса при вакуумно-высокочастотной сушке пиломатериалов большой длины (более 2 м) в одномерной постановке показали количественно противоречивый результат в виде чрезмерно большой продолжительности процесса, что можно объяснить большим гидродинамическим сопротивлением вдоль материала и отсутствием удаления влаги в перпендикулярном направлении. С использованием допущения [14], которое учитывает убыль влаги за счет фильтрационного движения пара под действием градиента давления в виде (2):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{Q_v}{r \cdot \rho_0}, \quad (2)$$

система (1) была упрощена до двух уравнений, а задача тепломассопереноса составлена в одномерной постановке (3):

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_i(T, u) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{Q_v(x, t)}{c(T, u) \cdot \rho_0} (1 - \xi(T, u)) \\ \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_m(T, u) \left(\delta(T, u) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right) - \xi(T, u) \frac{Q_v(x, t)}{\rho_0 \cdot r(T)} \end{cases} \quad (3)$$

Для описания процессов тепло- и массообмена с внешней средой заданы правые граничные условия (4) по аналогии с указанными в [15]:

$$\lambda_x(T, u) \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = \alpha_i (T_{cp} - T(L, t)) + r(T) \cdot j(t), \quad (4.1)$$

$$\rho_0 \cdot a_m(T, u) \left(\delta(T, u) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) = j(t), \quad (4.2)$$

$$j(t) = \alpha_m \rho_n(T) (u_{cp}(T_{cp}, P_{cp}) - u(L, t)), \quad (4.3)$$

где λ_x – теплопроводность вдоль волокон, Вт/(м·°C); α_i – коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·°C); T_{cp} – температура среды, °C; j – поверхностный поток влаги, кг/(м²·с); α_m – коэффициент влагообмена, м/с; ρ_n – плотность пара, кг/м³; u_{cp} – равновесная влажность среды, кг/кг.

Начальные условия сформулированы следующим образом (5):

$$T(x, 0) = T_0; \quad u(x, 0) = u_0, \quad (5)$$

где T_0 и u_0 – начальные температура и влагосодержание материала.

Качество высушенной заготовки опоры зависит от многих факторов. Перепад влагосодержания по толщине пиломатериала в процессе сушки не должен превышать допустимого значения, а по его окончании распределение влагосодержания по объему должно быть как можно равномернее. Это означает, что скорость сушки во всех внутренних зонах материала должна быть одинаковой. Из приведенной выше математической модели тепломассопереноса следует, что скорость сушки в основном зависит от скорости парообразования, которая определяется удельной мощностью внутренних источников теплоты в рассматриваемой точке. Поэтому для адекватного описания тепломассопереноса необходимо правильно задавать распределение внутренних источников теплоты, что согласно выражению (6):

$$Q_v(x, t) = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon(T, u) \operatorname{tg} \delta(T, u) |\dot{E}(x)|^2 \quad (6)$$

сводится к задаче нахождения распределения напряженности электрического поля [16].

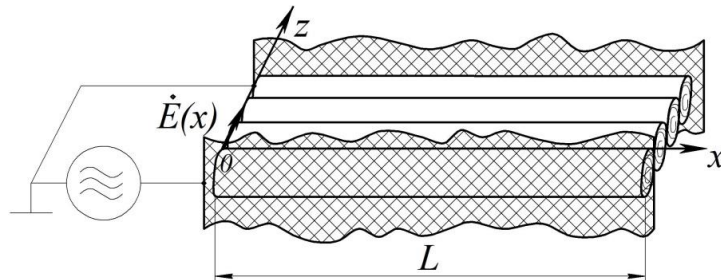


Рис. 2. Фрагмент рабочего конденсатора, заполненного заготовками опор

В продольном направлении размеры штабеля (рис. 2) соизмеримы с длиной электромагнитной волны. Это вызывает необходимость учитывать влияние на процесс сушки волновых электромагнитных явлений, которые приводят к образованию по длине пиломатериала узлов и пучностей напряженности электрического поля. Описание электромагнитного поля в продольном направлении штабеля основывается на системе уравнений Максвелла, которая после ряда допущений и преобразований сводится к уравнению Гельмгольца (7):

$$\frac{\partial^2 \dot{E}(x)}{\partial x^2} - \tilde{k}^2(x) \dot{E}(x) = 0, \quad (7)$$

где $\tilde{k}(x)$ – функция распределения волнового коэффициента, зависящая от меняющихся в процессе сушки диэлектрических свойств среды:

$$\tilde{k}(x) = i \cdot 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon(T, u) (1 - i \cdot \operatorname{tg} \delta(T, u))}. \quad (8)$$

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, описанных в [17, 18] показали высокую степень достоверности применения (7) и (8) для анализа распределения напряженности электрического поля вдоль штабеля совместно с

граничными условиями (9):

$$\frac{\partial \dot{E}(0)}{\partial x} = \tilde{k}(0) \cdot (\dot{E}(0) - E_{\max}); \quad \frac{\partial \dot{E}(L)}{\partial x} = 0; \quad E_{\max} = U / W, \quad (9)$$

где E_{\max} – амплитуда напряженности электрического поля падающей волны, В/м, W – расстояние между обкладками, м. Первое условие устанавливается в точках подключения ВЧ генератора, второе – на свободных концах обкладок рабочего конденсатора. Поскольку с целью повышения равномерности электромагнитного поля ВЧ генератор подключается к обкладкам по центру, то под L на рис. 2 и в формулах (4) и (9) следует понимать половину длины штабеля. Начало координат при этом располагается посередине штабеля, тогда левое граничное условие для задачи тепломассопереноса имеет вид (10):

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = 0. \quad (10)$$

Совместное рассмотрение задач тепломассопереноса (2)-(5) и электромагнитной (10)-(12) позволяет математически отразить процессы, происходящие внутри материала при вакуумно-высокочастотной сушке, однако для целостного описания всех явлений необходимо учесть изменение параметров внешней среды в рабочей камере, так как они влияют на интенсивность тепло- и влагообмена на поверхности материала. Изменение температуры и давления окружающей среды описываются уравнениями (11):

$$\frac{dP_r(t)}{dt} = P_r(t) \left(\frac{1}{T_{cp}(t)} \frac{dT_{cp}(t)}{dt} - \frac{Q_{с.г.}}{V_{св}} \right); \quad (11.1)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = \frac{S R T_{cp}(t)}{V_{св} \mu_n} j(t) - P_n(t) \left(\frac{Q_{с.п.}}{V_{св}} - \frac{1}{T_{cp}(t)} \frac{dT_{cp}(t)}{dt} \right); \quad (11.2)$$

$$\frac{dT_{cp}(t)}{dt} = \left(\frac{(\alpha_i S (T(L, t) - T_{cp}(t)) + c_n S T(L, t) j(t)) R}{(\mu_n p_n + \mu_r p_r) c_{cp} V_{св}} - \frac{Q_{с.г.} + Q_{с.п.}}{V_{св}} \right) T_{cp}(t), \quad (11.3)$$

где P_n , P_r – давление пара и газа соответственно, Па; S – площадь поверхности материала, м²; R – универсальная газовая постоянная; $V_{св}$ – свободный объем камеры, м³; ρ_n , ρ_r – молярная масса пара и газа соответственно, кг/моль; $Q_{с.п.}$, $Q_{с.г.}$ – производительности систем удаления пара и газа, м³/с; c_n , c_{cp} – теплоемкость пара и парогазовой среды соответственно, Дж/(кг·°C). Давление среды P_0 , Па, равно сумме парциальных давлений пара и газа (12):

$$P_{cp}(t) = P_n(t) + P_r(t). \quad (12)$$

Начальные условия для этой задачи заданы в виде (13):

$$T_{cp}(0) = T_{cp0}; \quad P_{cp}(0) = P_{атм}, \quad (13)$$

где T_{cp0} – начальная температура окружающей среды, °C; $P_{атм}$ – начальное давление в камере, принимаемое равным атмосферному, Па.

Таким образом, на основе анализа литературных источников и с использованием результатов ранее проведенных исследований получен математический аппарат, описывающий влияние волнового характера распределения параметров электромагнитного поля по длине заготовок опор и параметров внешней среды на температуру и влагосодержание материала. Его отличие от существующих математических моделей [19, 20] вакуумно-высокочастотной сушки заключается в возможности применения простых методов анализа систем дифференциальных уравнений и требовании меньшего количества исходных данных о свойствах высушиваемого материала.

Материалы и методы

Так как в представленной модели отражены взаимосвязи различных физических явлений, а свойства материала имеют нелинейный характер зависимости от температуры и влагосодержания, то для нее может быть проведен только численный анализ. При этом одномерность задачи позволяет выбрать численный метод конечных разностей, для которого шаг по времени и шаг по координате x определяются соотношениями:

$$\Delta t = t_{\max} / (N_t - 1); \quad \Delta x = L / (N_x - 1), \quad (14)$$

где N_t , N_x – количество узлов по времени и по координате конечно-разностной сетки.

Алгоритм расчета в виде блок-схемы показан на рис. 3. Исходными данными являются следующие параметры: L , W , S , $V_{св}$, U , f , $Q_{с.п.}$, $Q_{с.г.}$, T_0 , u_0 , T_{cp0} , $P_{атм}$, ρ_0 ; коэффициенты переноса и теплофизические свойства часто применяемой для

производства опор хвойной породы (сосны): $a_t(T, u)$, $a_m(T, u)$, $\delta(T, u)$, $\xi(T, u)$, $r(T)$, $c(T, u)$, $\varepsilon(T, u)$, $\text{tg}\delta(T, u)$.

На первом этапе расчета вычисляется распределение внутренних источников теплоты для текущего временного слоя i . Сначала по (15) находятся значения волнового коэффициента в j -х узлах пространственной сетки:

$$\tilde{k}_j = i \cdot 2\pi f \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) (1 - i \cdot \text{tg}\delta(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}))}. \quad (15)$$

После конечно-разностной аппроксимации дифференциального уравнения второго порядка (7) и граничных условий (9) получается система уравнений (16):

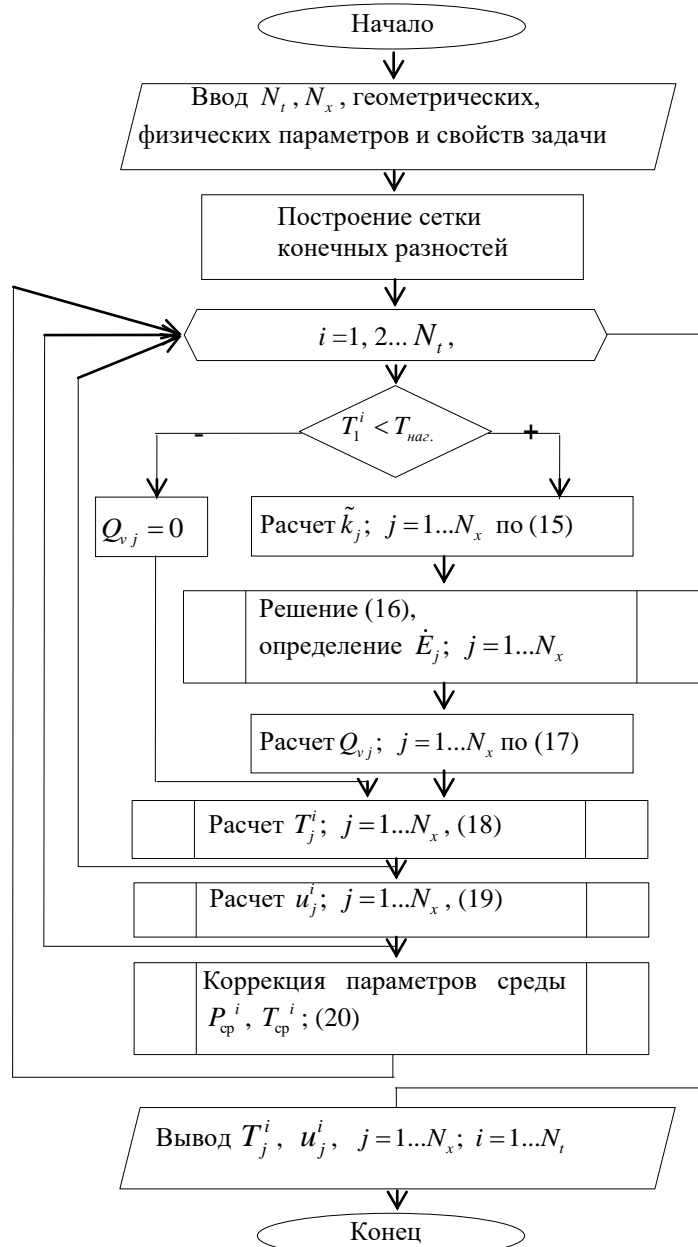


Рис. 3. Алгоритм анализа математической модели

$$\begin{cases} \dot{E}_j (1 + \tilde{k}_j \Delta x) - \dot{E}_{j+1} = \tilde{k}_j \Delta x \cdot E_{\max} & \text{при } j = 1; \\ \frac{1}{\Delta x^2} \dot{E}_{j-1} - \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \tilde{k}_j^2 \right) \dot{E}_j + \frac{1}{\Delta x^2} \dot{E}_{j+1} = 0 & \text{при } j = 2 \dots N-1; \\ \dot{E}_j - \dot{E}_{j-1} = 0 & \text{при } j = N_x. \end{cases} \quad (16)$$

Система линейных алгебраических уравнений решается матричным методом, в результате чего находятся значения напряженности электрического поля в узлах сетки, а по ним – значения удельной мощности внутренних источников:

$$Q_{vj} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon(T_j^{i-1}; u_j^{i-1}) \operatorname{tg} \delta(T_j^{i-1}; u_j^{i-1}) |\dot{E}_j|^2. \quad (17)$$

Если на каком-либо шаге по времени температура в центре материала ($j = 1$) превышает заданную температуру нагрева, то во всех точках задается отсутствие внутренних источников теплоты, что физически означает отключение ВЧ генератора.

В следующем вычислительном блоке в две стадии решается задача тепломассопереноса с применением явной схемы. На первой для текущего временного слоя рассчитывается поле температуры (18):

$$T_j^i = T_{j+1}^i \text{ при } j = 1; \quad (18.1)$$

$$T_j^i = T_j^{i-1} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left(\begin{aligned} & \frac{a_t(T_{j+1}^{i-1}, u_{j+1}^{i-1}) + a_t(T_{j+1}^{i-1}, u_{j+1}^{i-1})}{2} (T_{j+1}^{i-1} - T_j^{i-1}) - \\ & - \frac{a_t(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) + a_t(T_{j-1}^{i-1}, u_{j-1}^{i-1})}{2} (T_j^{i-1} - T_{j-1}^{i-1}) + \\ & + \frac{Q_{vj} \cdot \Delta x^2}{c(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) \cdot \rho_0} \end{aligned} \right) \text{ при } j = 2 \dots N_x - 1; \quad (18.2)$$

$$T_j^i = T_{j-1}^i + \frac{2\Delta x (\alpha_t (T_{cp}^{i-1} - T_j^{i-1}) + r(T_j^{i-1}) \cdot j^i)}{\lambda_x(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) + \lambda_x(T_{j-1}^{i-1}, u_{j-1}^{i-1})} \text{ при } j = N_x; \quad (18.3)$$

$$j^i = \alpha_m \rho_n (T_N^{i-1}) (u_{cp} (T_{cp}^{i-1}, P_{cp}^{i-1}) - u_N^{i-1}). \quad (18.4)$$

На второй стадии осуществляется расчет поля влагосодержания (19):

$$u_j^i = u_{j+1}^i \text{ при } j = 1; \quad (19.1)$$

$$u_j^i = u_j^{i-1} + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left(\begin{aligned} & \frac{a_m(T_{j+1}^i, u_{j+1}^{i-1}) + a_m(T_{j+1}^i, u_{j+1}^{i-1})}{2} (u_{j+1}^{i-1} - u_j^{i-1}) - \\ & - \frac{a_m(T_j^i, u_j^{i-1}) + a_m(T_{j-1}^i, u_{j-1}^{i-1})}{2} (u_j^{i-1} - u_{j-1}^{i-1}) + \\ & \frac{\psi(T_{j+1}^i, u_{j+1}^{i-1}) + \psi(T_{j+1}^i, u_{j+1}^{i-1})}{2} (T_{j+1}^i - T_j^i) - \\ & - \frac{\psi(T_j^{i-1}, u_j^{i-1}) + \psi(T_{j-1}^{i-1}, u_{j-1}^{i-1})}{2} (T_j^{i-1} - T_{j-1}^{i-1}) - \\ & - \xi(T_j^i, u_j^{i-1}) \frac{Q_{vj} \Delta x^2}{\rho_0 \cdot r(T_j^i)} \end{aligned} \right) \text{ при } j = 2 \dots N_x - 1; \quad (19.2)$$

$$u_j^i = u_{j-1}^{i-1} + \Delta x \left(\begin{aligned} & \frac{j^i}{\rho_0 (a_m(T_j^i, u_j^{i-1}) + a_m(T_{j-1}^i, u_{j-1}^{i-1}))} - \\ & - \frac{\delta(T_j^i, u_j^{i-1}) + \delta(T_{j-1}^i, u_{j-1}^{i-1})}{2} \frac{T_j^i - T_{j-1}^i}{\Delta x} \end{aligned} \right) \text{ при } j = N_x, \quad (19.3)$$

где $\psi(T, u) = a_m(T, u) \delta(T, u)$.

На последнем этапе расчета корректируются параметры окружающей среды (20):

$$T_{cp}^i = T_{cp}^{i-1} + \Delta t \cdot \left(\frac{(\alpha_t S (T_{N_x}^i - T_{cp}^{i-1}) + c_n S T_{N_x}^{i-1} j^i) R}{(\mu_n P_n + \mu_r P_r) c_{cp} V_{cv}} - \frac{Q_{с.г.} + Q_{с.п.}}{V_{cv}} \right) T_{cp}^{i-1}; \quad (20.1)$$

$$P_r^i = P_r^{i-1} + \Delta t \cdot P_r^{i-1} \left(\frac{1}{T_{cp}^i} \frac{T_{cp}^i - T_{cp}^{i-1}}{\Delta t} - \frac{Q_{с.г.}}{V_{cv}} \right); \quad (20.2)$$

$$P_n^i = P_n^{i-1} + \Delta t \left(\frac{S R T_{cp}^i}{V_{cv} \mu_n} j^i - P_n^{i-1} \left(\frac{Q_{с.п.}}{V_{cv}} - \frac{1}{T_{cp}^i} \frac{T_{cp}^i - T_{cp}^{i-1}}{\Delta t} \right) \right) \quad (20.3)$$

$$P_{cp}^i = P_r^i + P_n^i \quad (20.4)$$

Результаты

Проверка адекватности математической модели и точности методики ее анализа проведена путем сравнения полученных теоретических результатов с экспериментальными. В работе [21] использовалась вакуумно-высокочастотная камера, укомплектованная генератором с параметрами: $U_{max} = 1$ кВ, $f = 27$ МГц. Сушка образцов

древесины хвойной породы (Криптомерия японская) размером 0,85 x 0,12 x 0,12 м проводилась при температуре нагрева 60 °С и давлении в камере 6,7 кПа. Постоянство температуры нагрева обеспечивалось двухпозиционным регулированием по её значению в центре образцов. Начальное влагосодержание составляло $u_0 = 0,558$ кг/кг.

Исходные данные для моделирования были согласованы с условиями проведения эксперимента [21]. Время сушки устанавливалось 16 ч, число узлов временной сетки $N_t = 1000$, а пространственной $N_x = 30$. Недостающие сведения определены на основе предварительных численных экспериментов. Так было установлено, что напряжение на электродах не было постоянным, а регулировалось таким образом, чтобы в материале поддерживалась удельная мощность внутренних источников, равная 5,8 кВт/м³. Соответствующие изменения были внесены в математическую модель. Дополнительно был определен верхний предел регулирования напряжения на обкладках, который оказался ниже максимального значения для данного генератора. Это, а также тот факт, что полученное значение лежит в рекомендуемом для высокочастотной сушки диапазоне удельной мощности, свидетельствует о непротиворечивости модели. Однако окончательный вывод об адекватности модели можно сделать только после анализа ее точности.

Результаты расчетов получены в виде массива данных, содержащего значения температуры и влагосодержания в узлах пространственной сетки для каждого шага по времени ($(T_j^i, u_j^i, j=1..N_x; i=1..N_t)$). Путем обработки исходного массива с помощью простых алгоритмов сформированы векторы значений температуры в период нагрева в центре и на поверхности материала ($T_1^i, T_{N_x}^i, i=1...250$), которые затем были интерполированы и представлены в виде непрерывных функций на рис. 4. Аналогичным образом получен график зависимости среднего влагосодержания от времени сушки, показанный на рис. 5.

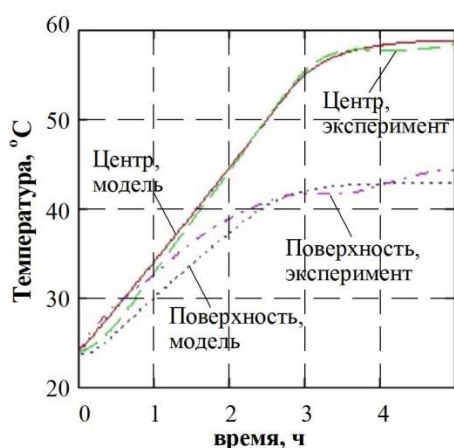


Рис. 4. Изменение температуры в центре и на поверхности материала на стадии нагрева по результатам моделирования и эксперимента

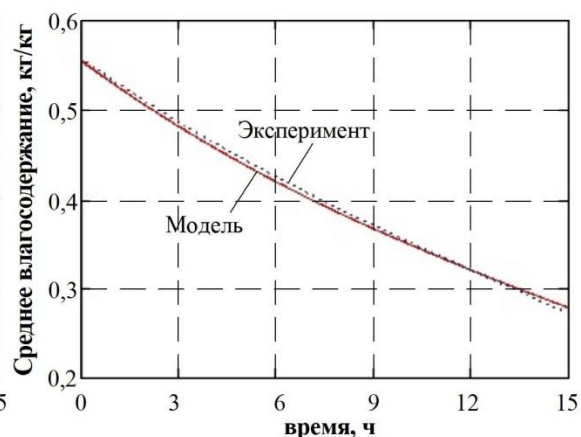


Рис. 5. Изменение среднего влагосодержания в процессе сушки по результатам моделирования и эксперимента

Обсуждение

Теоретические и экспериментальные кривые, описывающие нагрев в центре материала (рис. 4), практически совпадают, что свидетельствует о достаточно точном моделировании процесса во внутренних зонах. Явления, возникающие в поверхностных зонах, более разнообразны и требуют точного задания граничных условий, что не всегда возможно по описанным причинам. Например, в данной работе коэффициент конвективного теплообмена задавался постоянным, но в действительности зависит от многих факторов: способа обработки поверхности опор, температуры и влагосодержания древесины, а также от параметров окружающей среды. Несмотря на это, по окончании нагрева и модель, и эксперимент демонстрируют одинаковую температуру поверхности 42 °С.

Кривые изменения среднего влагосодержания во времени сушки (рис. 5) также совпадают. Абсолютная погрешность не превышает 0,006 кг/кг, что относительно начального влагосодержания составляет 1,07 %.

Дополнительные численные эксперименты, проведенные без учета распределения электромагнитного поля (15-17), показали существенное отличие теоретических и экспериментальных кривых, как для температуры, так и для среднего влагосодержания.

Отличия заключались в полуторакратном увеличении скорости нагрева и сушки, что противоречит экспериментальным данным. Это подтвердило необходимость учета взаимного влияния распределения внутренних источников теплоты и изменения температуры и влагосодержания в процессах нагрева и сушки.

Выводы

Использованное допущение (2) позволило упростить исходную модель тепломассопереноса и отказаться от рассмотрения взаимного влияния трех его движущих факторов, а одномерная постановка задачи с учетом распределения внутренних источников теплоты оказалась подходящей для объектов большой длины. Как результат, количество требуемых исходных данных было уменьшено, что неоднозначно повлияло на применимость модели. С одной стороны, в силу простоты реализации и достаточной адекватности ее следует считать эффективным средством проведения дальнейших исследований в области оптимизации конструкции (с точки зрения равномерности процесса) рабочих камер вакуумно-высокочастотных установок для сушки деревянных опор ЛЭП и других длинных пиломатериалов. С другой стороны, полученный одномерный математический аппарат не позволяет исследовать перепад влагосодержания по сечению материала. Таким образом, он не применим для задач оптимизации режимов сушки, которые могут быть решены на основе уже существующих моделей.

Литература

1. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С. Способы и установки контроля опор из трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20. № 5-6. С. 93-101.
2. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С. Разработка методики и специального стенда ИС-1 для испытания опор контактных сетей электрического транспорта // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т.19. № 1-2. С. 152-163.
3. Медведев И.Н. Разработка технологии и оборудования для получения заготовок шпал и опор линий электропередач из модифицированной древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 6. С. 102–109.
4. Тимербаев Н.Ф., Сафин Р.Г., Зиятдинова Д.Ф., Степанова О.Т. Конвективная сушка дисперсных материалов перед термохимическим процессом переработки // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т.21. № 5. С. 29-37.
5. Галкин В.П., Курышов Г.Н., Косарин А.А., Моисеев С.А., Деянов Д.И. Сушка крупных пило- и лесоматериалов // Лесной вестник/ Forestry Bulletin. 2018. Т. 2. № 2. С. 59-68.
6. Mohd-Jamil A.W., Zairul A.R. Mechanical Properties of Timber Dried Using Radio Frequency–Vacuum System. In: Pradhan B. (eds) GCEC 2017. GCEC 2017. Lecture Notes in Civil Engineering, V. 9. Springer, Singapore. 2017. P. 185-192.
7. Zhao, X., Lee C. (2020). Characteristics of radio-frequency/vacuum combined with mechanical press drying of heavy softwood timbers with longitudinal kerf. *Holzforschung*, 2020. V. 75. № 1. P. 48–55.
8. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Выбор способа сушки древесины по критерию себестоимости // 11 международная научно-практическая интернет-конференция «Энерго- и ресурсосбережение - 21 век». г.Орел, 2013. С. 211-213.
9. Boldor D.A., Sanders T.H., Swartzel K.R., Farkas B.E. Model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying // J. of Food Process Engineering. 2005. V. 28. P. 68-87.
10. Марков А.В., Юленец Ю.П. Механизм массопереноса в высокоинтенсивных процессах сушки при наличии внутренних источников тепла // Теор. основы химической технологии. 2002. Т. 36. № 3. С. 268-274.
11. Комаров В.В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т.13. № 4. С. 57-63.
12. Younsi R., Kadem S., Lachemet A., Kocaefe D. Transient analysis of heat and mass transfer during heat treatment of wood including pressure equation. *Thermal Science*. 2015. V. 19. № 2. P. 693-702.
13. Горешнев М.А., Казарин, А.Н., Алексеев М.В. Моделирование тепломассопереноса древесины при нагреве в камере с пониженным давлением // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 2010. Т. 3. С. 172-173.
14. Синютин Е.В., Юленец Ю.П. Автоматизированная система управления оптимальным режимом сушки древесины в высокочастотном электрическом поле // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2008. №8. С. 1-7.

15. Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г. Математическая модель процесса конвективной сушки пиломатериалов в разреженной среде // Лесной журнал. 2006. № 4. С. 64-71.
16. Chai Hao-jie, Zhao Jing-Yao, Cai Ying-Chun. An analysis of heating uniformity in wood high-frequency drying. *Wood and Fiber Science*. 2018. Vol. 50. № 3. P. 337-345. DOI: 10.22382/wfs-2018-032.
17. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Описание электромагнитного поля в плоском конденсаторе при высокочастотном нагреве длинномерных диэлектриков // Вестник КрасГАУ. 2016. № 10(121). С. 137-143.
18. Качанов А.Н., Коренков Д.А. Математическая модель распределения электромагнитного поля в длинных плоских конденсаторах с диэлектриком из древесины // Промышленная энергетика. 2016. № 9. С. 23 -27.
19. Jia, X. Radio frequency vacuum drying of timber. Mathematical model and numerical analysis [Text] / X. Jia, J. Zhao, Y. Cai // *BioResources*. 2015. V. 10(3). P. 5440-5459.
20. Koumoutsakos A., Avramidis, S., Hatzikiriakos, S. Radio frequency vacuum drying of wood. I. Mathematical model. *DRYING TECHNOLOGY*. 2001 V. 19(1). P. 65-84.
21. Liu H.N., Yang L., Cai Y., Hayashi K., Li K. Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying [Text] // *Bio Resources*. 2014. V. 9. № 2. P. 3064-3076.

Авторы публикации

Качанов Александр Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрооборудования и энергосбережения Орловского государственного технического университета имени И.С. Тургенева.

Коренков Дмитрий Андреевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и энергосбережения, Орловский государственный технический университет имени И.С. Тургенева.

Ревков Артем Александрович – учебный мастер Орловский государственный технический университет имени И.С. Тургенева.

Максимов Виктор Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет.

Воркунов Олег Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и сети», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gatiyatov IZ, Sabitov LS. Methods and installations for monitoring of supports made of tubular rods used in power construction when exposed to static and dynamic loads. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20:5-6:93-101.
2. Gatiyatov IZ, Sabitov LS. Development of the procedure and special bench IS-1 for testing the supports of contact networks of electric transport. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(1-2):152-163.
3. Medvedev IN. Development of technology and equipment for production of sleepers and supports of power transmission lines from modified wood. *Forestry Bulletin*. 2018;22(6):102–109.
4. Timerbaev NF, Safin RG, Ziatdinova DF., et al. Convective drying of dispersed materials prior to thermochemical processing. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):29-37.
5. Galkin VP, Kuryshov GN, Kosarin A.A., et al. Drying of large sawmills and timber. *Forestry Bulletin*. 2018;2(2):59-68.
6. Mohd-Jamil AW, Zairul AR. *Mechanical Properties of Timber Dried Using Radio Frequency–Vacuum System*. In: Pradhan B. (eds) GCEC 2017. GCEC 2017. Lecture Notes in Civil Engineering., Springer, Singapore. 2017;9:185-192. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_14.
7. Zhao X, Lee C. *Characteristics of radio-frequency/vacuum combined with mechanical press drying of heavy softwood timbers with longitudinal kerf*. *Holzforschung*, 2020;75(1):48–55. doi: 10.1515/hf-2019-0261.
8. Kachanov AN, Korenkov DA. *Selection of wood drying method according to cost criterion*. 11 th International Scientific and Practical Internet Conference Energy and Resource Saving – 21 th Century. 2013. P. 211-213.
9. Boldor DA, Sanders TH, Swartzel KR, et al. Model for temperature and moisture distribution during continuous microwave drying. *J. of Food Process Engineering*. 2005;28:68-87.

10. Markov AB, Yulenets YuP. Mass transfer mechanism in high-intensity drying processes in the presence of internal heat sources. *Theoretical basics of chemical technology*. 2002;36(3):268-274.
11. Komarov VV. Formulations of mathematical models of processes of interaction of electromagnetic waves with dissipative media in microwave heating systems. *Wave process physics and radio engineering systems*. 2010; 13(4):57-63.
12. Younsi R, Kadem S, Lachemet A, et al. Transient analysis of heat and mass transfer during heat treatment of wood including pressure equation. *Thermal Science*. 2015;19(2):693-702. doi: 10.2298/TSCI120309113Y.
13. Goreshev M.A., Kazarin, A.N., Alekseev M.V. *Simulation of heat and mass transfer of wood during heating in the chamber with reduced pressure*. Collection of works of the 16 th International Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists, Tomsk. 2010;3. :172-173.
14. Sinyutin EV, Yulenets YuP. Automated control system for optimal drying of wood in high-frequency electric field. Instruments and systems. *Control, control, diagnostics*. 2008;8:1-7.
15. Safin RR, Khasanshin RR, Safin R.G. Mathematical model of lumber convective drying process in rarefied environment. *Forestry Bulletin*. 2006;4:64-71.
16. Chai Hao-jie, Zhao Jing-Yao, Cai Ying-Chun. An analysis of heating uniformity in wood high-frequency drying. *Wood and Fiber Science*. 2018;50(3):337-345. doi: 10.22382/wfs-2018-032.
17. Kachanov AN, Korenkov DA. Description of electromagnetic field in flat capacitor with high-frequency heating of long dielectric. *The Bulletin of KrasGAU*. 2016;10(121):137-143.
18. Kachanov AN, Korenkov DA. Mathematical model of electromagnetic field distribution in long flat capacitors with wood dielectric. *Industrial energy*. 2016;9:23 -27.
19. JiaX. Radio frequency vacuum drying of timber. Mathematical model and numerical analysis *BioResources*. 2015;10(3):5440-5459.
20. Koumoutsakos A, Avramidis S, Hatzikiriakos S. Radio frequency vacuum drying of wood. I. Mathematical model. *DRYING TECHNOLOGY*. 2001;19(1):65-84. doi: 10.1081/DRT-100001352.
21. Liu HH, Yang L, Cai Y, et al. Distribution and variation of pressure and temperature in wood cross section during radio-frequency vacuum (RF/V) drying. *BioResources*. 2014;9(2):3064-3076.

Authors of the publication

Aleksandr N. Kachanov – Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia.

Dmitrii A. Korenkov – Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia.

Artem A. Revkov – Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia.

Maksimov V. Viktor – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Oleg V. Vorkunov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

15 ноября 2020 г.

Отредактировано

27 ноября 2020г.

Принято

10 декабря 2020г.