

DOI

УДК 621.365.5

## СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ И ПОЛИКАПРОАМИДНЫХ НИТЕЙ

М. И. Тухватуллин

**Реферат.** Исследования проводили с целью определения оптимальных режимов одновременной обработки пиломатериалов и поликапроамидных нитей в гибридной СВЧ электротехнологической установке. Работу осуществляли на установке с камерой гибридного типа с регулировкой уровня СВЧ мощности магнетронов и продолжительности воздействия. Представлены две возможные конструкции гибридной установки для обработки пиломатериалов и поликапроамидных нитей, отличающиеся тем, что в одном пиломатериалы обрабатывали внутри камеры, а поликапроамидные нити протягивали через волноводы с помощью бобин и электродвигателя, установленных снаружи камеры, а во втором оба материала обрабатывали внутри камеры установки. Объект исследования – пиломатериалы и поликапроамидные нити. Пиломатериалы загружали в рабочую камеру в форме штабеля, который вращался вдоль своей оси и рассматривали конструкцию, в которой поликапроамидные нити протягивали через волновод, отходящий от источника СВЧ энергии снаружи камеры. Время воздействия СВЧ излучения на пиломатериалы и полкапроамидные нити измеряли с использованием электронных секундомеров, температуру и влажность – с использованием термометра Testo 905T2, пирометра Testo 830T1, цифрового гигрометра Testo 606-1. Использование гибридной СВЧ электротехнологической установки сокращало время обработки пиломатериалов благодаря вращению в поле СВЧ до 15 ч, при этом обеспечивалось требуемое качество высушиваемого материала (конечная влажность – 7,1%, уменьшение прочности на скалывание и ударный изгиб в пределах 5%). Относительное разрывное удлинение поликапроамидных нитей увеличивалось на 48,2%, разрывная нагрузка – на 27,6%. Благодаря одновременной обработке пиломатериалов и поликапроамидных нитей можно уменьшить металлоемкость и повысить энергетическую эффективность установки.

**Ключевые слова:** СВЧ установка, камера гибридного типа, тепловая и нетепловая обработка, пиломатериалы, поликапроамидные нити, магнетрон.

**Введение.** Технологические процессы СВЧ обработки материалов и изделий широко распространены при производстве полимерных материалов (сушка окрашенных кашемировых волокон [1], обработка полимеров [2], микроволновое поглощение многослойными структурами [3]), в лесной и деревообрабатывающей промышленности (вакуумная СВЧ сушка круглого бамбука [4], облущение щепы различных пород древесины [5], сушка древесных стружек [6]), сельском хозяйстве (сушка риса [7] и фермерских продуктов [8], конвекционная комбинированная сушка эфирных масел [9]), медицине (изготовление материалов с улучшенными характеристиками поглощения микроволн [10], полимеризация алкилов, альдегидов и аминов в микроволновой печи [11]), пищевой промышленности (термическая стерилизация продуктов [12, 13]).

При этом можно выделить следующие основные проблемы использования электромагнитной энергии СВЧ при тепловой обработке различных материалов: сложность контроля обработки материалов, громоздкость конструкции электротехнологических установок, высокие энергетические затраты, обработка только одного вида материала в камере.

Ухудшение качества СВЧ сушки пиломатериалов и поликапроамидных нитей связано с интенсивностью обработки, так при длительном воздействии СВЧ энергии повышенной мощности происходит изменение внутренней и внешней структуры материала [1].

Для того чтобы уменьшить энергетические

затраты, упростить конструкцию устройства для одновременной обработки двух различных материалов, автором разработана СВЧ электротехнологическая установка с камерой гибридного типа, в которой одновременно происходит тепловая СВЧ обработка пиломатериалов и нетепловая поликапроамидных нитей.

Цель исследования – определение оптимальных режимов одновременной обработки пиломатериалов и поликапроамидных нитей в гибридной СВЧ электротехнологической установке.

Для ее достижения решали следующие задачи:

привести техническую характеристику и описание разработанной СВЧ электротехнологической установки с камерой гибридного типа.

провести экспериментальные исследования по одновременной обработке пиломатериалов и поликапроамидных нитей в гибридной СВЧ установке.

**Условия, материалы и методы.** Источник СВЧ энергии (рис. 1) представляет собой генератор и блок питания (напряжение питания 220 В, частота 50 Гц). СВЧ энергия проходит через волновод, где осуществляется обработка поликапроамидных нитей, которые подаются с помощью устройства загрузки-выгрузки, далее она поступает в рабочую камеру, в которой обрабатываются пиломатериалы, вращающиеся вдоль своей оси. Таким образом, в гибридной СВЧ электротехнологической установке происходят

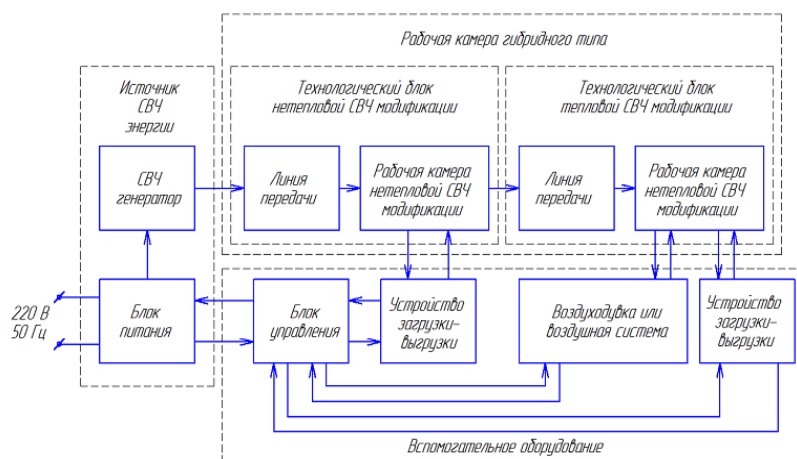


Рис. 1 – Схема гибридной СВЧ электротехнологической установки

Использование СВЧ электротехнологической установки с камерой гибридного типа дает возможность уменьшить металлоемкость конструкции, увеличить экономическую и энергетическую эффективность ее использования, благодаря уменьшению потребления электрической энергии на единицу обрабатываемого сырья.

Время сверхвысокочастотной нетепловой обработки сырья задается изменением скорости прохождения поликапроамидных нитей вдоль широких стенок прямоугольного волновода и регулированием мощности СВЧ генератора.

В рассматриваемой рабочей камере гибридного типа распространяется квази- $H_{10}$  волна, у которой фазовая постоянная и коэффициент затухания равны [14]:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}; \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\pi^2 d \varepsilon_2' \operatorname{tg} \delta_2}{2a\lambda \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (2)$$

где

$\lambda$  – длина волны, м;

$a$  – ширина широкой стенки волновода, м;

$d$  – толщина слоя обрабатываемого материала, м;

$\varepsilon_2$  – относительная диэлектрическая проницаемость обрабатываемого материала, Ф/м;

$\operatorname{tg} \delta_2$  – тангенс угла диэлектрических потерь обрабатываемого материала.

Напряженность электромагнитной волны:

$$E(z) = E_0 \exp\left[(-\alpha + j\beta)z\right], \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  определяются соотношениями (1) и (2), а амплитуда напряженности  $E_0$  равна [15]:

$$E_0 = \frac{2\sqrt{\frac{P}{ab}} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (4)$$

где

$P$  – СВЧ мощность, Вт;

$axb$  – размеры волновода, м;

$\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость среды, Гн/м;

$\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды Ф/м;

$\lambda$  – длина волны СВЧ генератора, м.

СВЧ обработка поликапроамидных нитей зависит от следующих параметров:

длина волны  $\lambda$  источника СВЧ энергии, м.;

напряженность  $E_3$  электромагнитного поля в рабочей камере, В/м;

время нахождения поликапроамидной нити в СВЧ электромагнитном поле  $\tau_{OBR}$ , с.;

производительность  $G$  рабочей камеры гибридного типа;

ориентация поликапроамидной нити по направлению вектора  $E$ .

В прямоугольном волноводе время пребывания поликапроамидной нити можно рассчитать следующим образом

$$\tau = \frac{b}{G}. \quad (5)$$

Если время  $\tau_{OBR}$  нахождения полимерной нити в СВЧ электромагнитном поле и допустимое отклонение  $\pm \Delta\tau_{OBR}$  меньше  $\tau$ , то следует уменьшить величину  $b$ , снизив при этом и СВЧ мощности, если больше  $\tau$ , то ее можно увеличить, протягивая поликапроамидную нить сквозь волновод  $n$  раз. Тогда длина щели в волноводе, через которую протягивается поликапроамидную нить составит [16]:

$$L_1 = nd, \quad (6)$$

где  $d$  – диаметр поликапроамидной нити, м.

Максимальную длину щели с учетом  $E(z)$  и амплитуды напряженности  $E_3$  электромагнитного поля в рабочей камере, при которой наблюдается максимальное изменение

нужного технологического параметра и допустимое отклонение амплитуды напряжения  $\pm \Delta E_3$ , можно определить из соотношения:

$$E_3 - \Delta E_3 = (E_3 + \Delta E_3) \exp[-\alpha L_2] \quad (7)$$

где  $L_2$  - длина щели, м.

Величину  $a$  по всей длине щели можно считать постоянной, так как поликапроамидная нить практически не нагревается и при  $\Delta E_3/E_3 \gg 1$ :

$$L_2 = \frac{1}{\alpha} \left(1 + \frac{2\Delta E_3}{E_3}\right) \quad (8)$$

При обработке поликапроамидной нити величина  $a$  обычно незначительна и  $L_2 \ll L_1$ , поэтому нить можно пропустить через волновод  $n$  раз.

Количество таких нитей, одновременно пропущенных через волновод будет равно:

$$k = \frac{L_2}{L_1} \quad (9)$$

То есть производительность СВЧ обработки поликапроамидных нитей  $G$  возможно увеличить в  $k$  раз, по сравнению с обработкой одной полимерной нити. Энергопотребление в целом при этом не изменяется, а в расчете на единицу обрабатываемых поликапроамидных нитей уменьшается.

Одна из возможных конструкций гибридной СВЧ электротехнологической установки представляет собой камеру, на стенках которой в шахматном порядке смонтированы источники СВЧ энергии, блоки питания и волноводы (рис. 2).

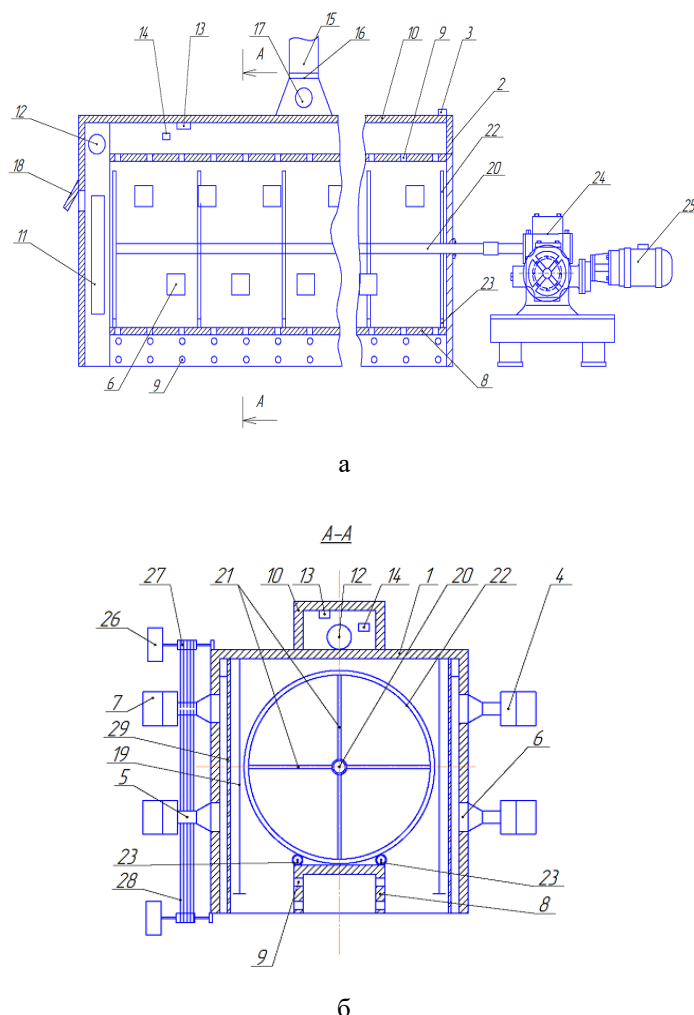


Рис. 2 – Схема конструкции гибридной СВЧ электротехнологической установки с протягиванием поликапроамидных нитей через волноводы снаружи камеры: 1 – камера, 2 – дверь, 3 – выключатель, 4 – источник СВЧ энергии, 5 – волновод, 6 – рупорный излучатель, 7 – блок питания, 8 – поддон, 9 – короб с отверстиями, 10 – воздуховод, 11 – калорифер, 12 – вентилятор, 13 – датчик температуры, 14 – датчик-электровлагомер, 15 – вентиляционная труба, 16 – обратный клапан, 17 – вентилятор вытяжки, 18 – люк для забора свежего воздуха, 19 – вертикальные перегородки, 20 – вал, 21 – крестовины, 22 – кольца, 23 – ролики, 24 – редуктор, 25, 26 – электродвигатель, 27 – бобины, 28 – поликапроамидные нити, 29 – четвертьволновой согласующий трансформатор

Внутри камеры расположен механизм для крепления пиломатериалов и вращения их вдоль своей оси, поликапроамидные нити протягиваются через волноводы с помощью бобин и электродвигателя снаружи камеры. Кроме того, в камере смонтированы четвертьволновые согласующие трансформаторы, расположенные между стенками камеры и

вертикальными перегородками.

Вторая из возможных конструкций гибридной СВЧ электротехнологической установки отличается от первой тем, что поликапроамидные нити протягиваются перед рупорным излучателем внутри камеры посредством бобин и электропривода, установленного за камерой.

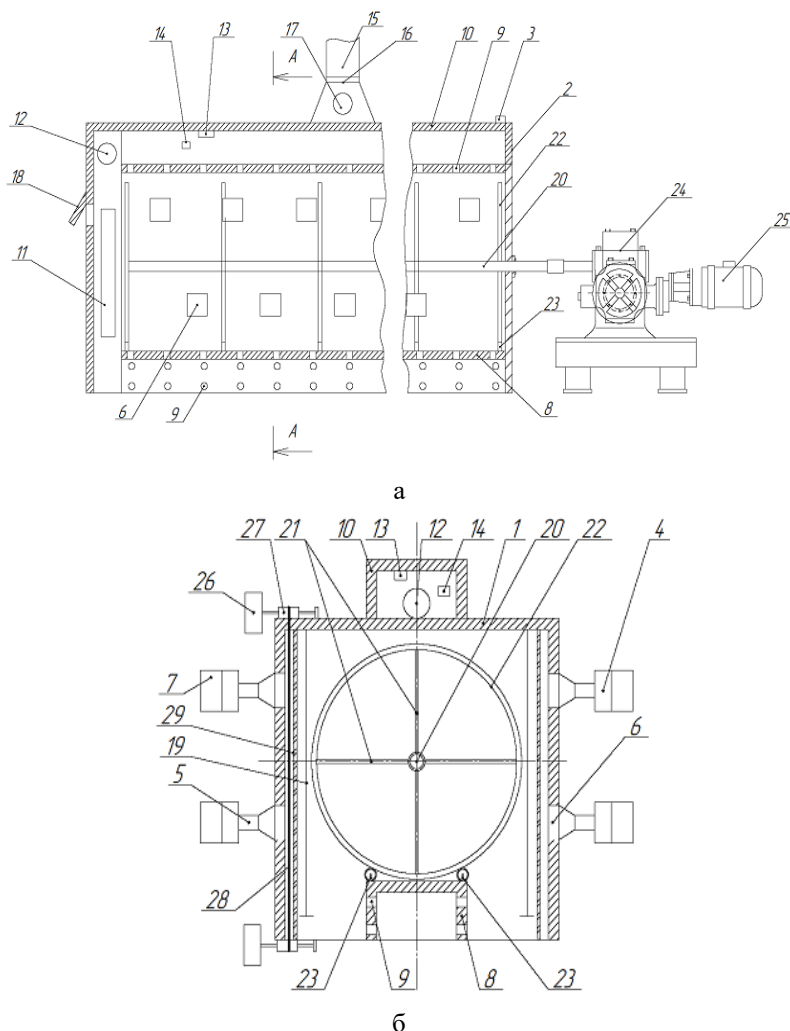


Рис. 3 – Схема второй конструкции гибридной СВЧ электротехнологической установки с протягиванием поликапроамидных нитей через волноводы внутри камеры: 1 – камера, 2 – дверь, 3 – выключатель, 4 – источник СВЧ энергии, 5 – волновод, 6 – рупорный излучатель, 7 – блок питания, 8 – поддон, 9 – короб с отверстиями, 10 – воздуховод, 11 – калорифер, 12 – вентилятор, 13 – датчик температуры, 14 – датчик-электровлагомер, 15 – вентиляционная труба, 16 – обратный клапан, 17 – вентилятор вытяжки, 18 – люк для забора свежего воздуха, 19 – вертикальные перегородки, 20 – вал, 21 – крестовины, 22 – кольца, 23 – ролики, 24 – редуктор, 25, 26 – электродвигатель, 27 – бобины, 28 – поликапроамидные нити, 29 – четвертьволновой согласующий трансформатор

На основании проведенных экспериментальных исследований поликапроамидные нити, подвергаемые нетепловой СВЧ модификации в гибридной СВЧ электротехнологической установке, должны протягиваться в СВЧ электромагнитном поле со скоростью 0,9 см в секунду, параллельно вектору напряженности  $E$ .

Однако вращение штабеля пиломатериалов влияет на изменение направления движе-

ния электромагнитного поля внутри камеры, а потому структура электромагнитного поля непрерывно меняется.

Это способствует сушке пиломатериалов, но для нетепловой СВЧ модификации поликапроамидных нитей в такой совмещенной рабочей камере следует выбирать зоны расположения непосредственно около апертуры излучающих систем СВЧ установки (рис. 4).

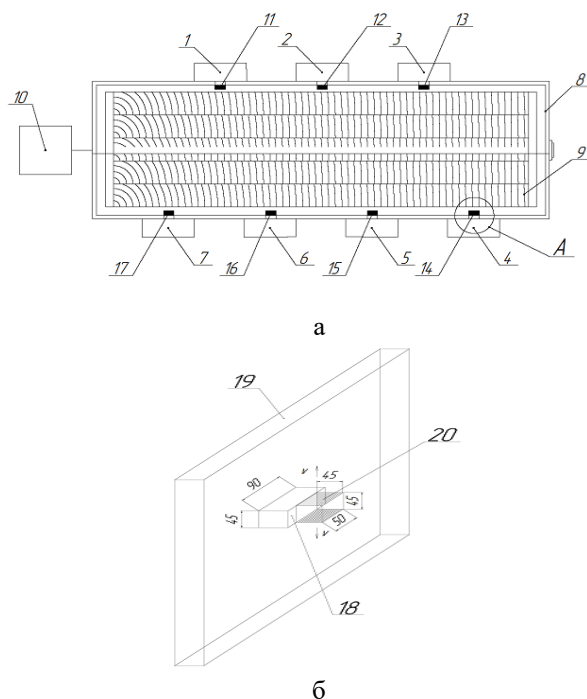


Рис. 4 – Зоны расположения поликапроамидных нитей в рабочей камере гибридной СВЧ электротехнологической установки: а – вид сверху, б – вид А; 1...7 – источник СВЧ энергии, 8 – камера, 9 – штабель пиломатериалов, 10 – электропривод, 11...17 – зоны расположения поликапроамидных нитей, 18 – апертура излучателя (сечение прямоугольного волновода (45x90мм), 19 – боковая стенка рабочей камеры, 20 – зона расположения поликапроамидных нитей,  $v$  – скорость движения модифицируемого полимерного материала

Если пары влаги, испаряющейся из пиломатериалов, опасны для поликапроамидных нитей, проходящих нетепловую СВЧ модификацию, то они могут быть защищены влагонепроницаемой тонкой диэлектрической радиопрозрачной перегородкой (рис. 3, пункт 19), отделяющей зоны расположения поликапроамидных нитей и пиломатериалов.

Конструкция гибридной СВЧ электротехнологической установки выгодно отличается от установок, в которых одновременно обрабатывается только один вид материалов: меньшей занимаемой площадью, металлоемкостью и большей площадью поперечного сечения зоны размещения поликапроамидных нитей

внутри камеры, но характеризуется более сложной транспортной системой. Кроме того, отсутствие рупорных излучателей неблагоприятно скажется на качестве модификации полимерных нитей, так как отраженная от входа в рабочую камеру СВЧ энергия создает режим частично стоячей волны (рис. 4). Эту проблему можно решить, используя четвертьволновый согласующий трансформатор (рис. 2 и 3, пункт 29).

В исследовании использовали установку (рис. 5, 6), собранную по конструкции, представленной на рис. 3. Обработка пиломатериалов и поликапроамидных нитей осуществляется внутри ее камеры.

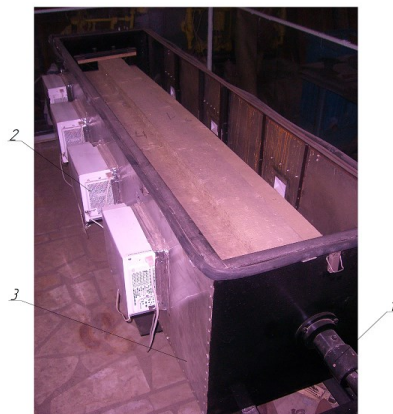


Рис. 5 – Общий вид гибридной СВЧ электротехнологической установки для обработки пиломатериалов и поликапроамидных нитей: 1 – вал, обеспечивающий вращение штабеля пиломатериалов, 2 – магнетроны, 3 – корпус СВЧ сушилки

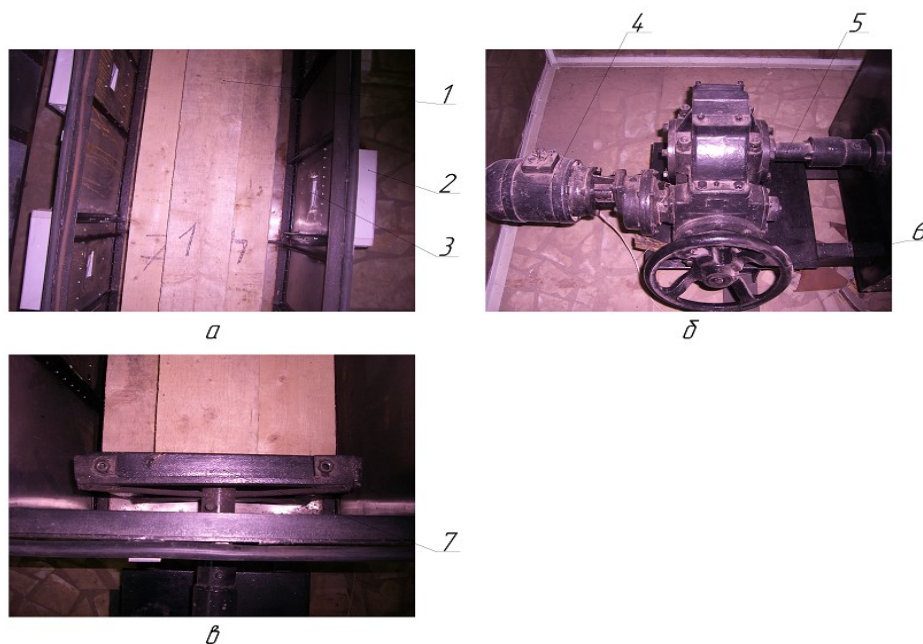


Рис. 6 – Основные элементы гибридной СВЧ электротехнологической установки для обработки пиломатериалов и поликапроамидных нитей: а – внутреннее пространство камеры, б – механизм, обеспечивающий вращение пиломатериалов, в – механизм для крепления штабеля пиломатериалов; 1 – пиломатериалы, 2 – источник СВЧ энергии, 3 – зона для обработки поликапроамидных нитей, 4 – двигатель, 5 – вал, 6 – механизм для ручного вращения пиломатериалов, 7 – рама для крепления штабеля пиломатериалов

Гибридная СВЧ электротехнологическая установка имела следующие размеры:  $2,4 \times 0,6 \times 0,6 \text{ м}^3$ . Источники СВЧ энергии были расположены на стенках: четыре слева и три справа камеры. Выходную мощность каждого источника СВЧ энергии можно изменять от 100 Вт до 700 Вт, частота равна 2450 МГц.

В экспериментальных исследованиях использовали сосновые доски размерами  $0,05 \times 0,15 \times 2 \text{ м}$ , которые укладывали в штабель. Между досками для лучшего прохождения СВЧ энергии были установлены деревянные прокладки размером 5 мм. Штабель вращали в электромагнитном поле вдоль своей оси относительно магнетронов,

расположенных в шахматном порядке на стенках рабочей камеры, с частотой 3 об/мин.

Начальная влажность пиломатериалов варьировала от 84 до 92%. Тепловую СВЧ обработку пиломатериалов осуществляли до конечной влажности 7...9%. Поликапроамидные нити протягивали параллельно вектору напряженности электрического поля перед апертурой излучателя (сечение прямоугольного волновода размерами  $45 \times 90 \text{ мм}$ ) одного из источников СВЧ энергии со скоростью 0,9 см в секунду. СВЧ мощность одного источника СВЧ энергии принимали равной 100 Вт, время нетепловой СВЧ обработки поликапроамидных нитей – 10 с.

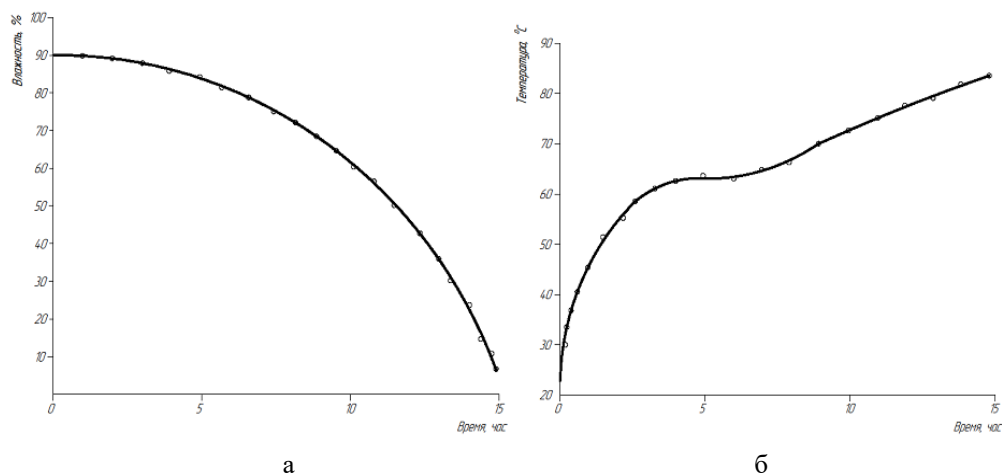


Рис. 7 – Результаты экспериментальных исследований изменения влажности и температуры пиломатериалов в процессе СВЧ обработки в камере: а – изменение влажности; б – изменение температуры



Время воздействия СВЧ излучения на пиломатериалы и поликапроамидные нити измеряли электронными секундомерами, температуру и влажность – с использованием поверенных термометра Testo 905T2, пирометра Testo 830T1 и цифрового гигрометра Testo 606-1 (измерения проводили каждые 45 мин.). Прочность пиломатериалов (сосновые доски) после тепловой СВЧ обработки определяли на лабораторном прессе.

**Результаты и обсуждение.** Благодаря вращению в поле СВЧ время обработки пиломатериалов в электротехнологической установке с камерой гибридного типа сокращается

с 40 ч (без вращения) до 15 ч, или на 62,5%. При этом их влажность снижалась с 89% до 7,1%, температура возрастает с 21°C до 84°C. Для сравнения, например, конвективная сушка листовницы в воздухе повышенной температуры и низкой влажности при циркуляции сушильного агента через штабель составляет 150 часов [17].

Предел прочности сосновых досок равен 36,4 МПа. Отклонение экспериментальной величины этого показателя от нормы составляло 4,4%. Качество сосновых досок соответствовало II категории, обугливание, коробление и кручение отсутствовали.

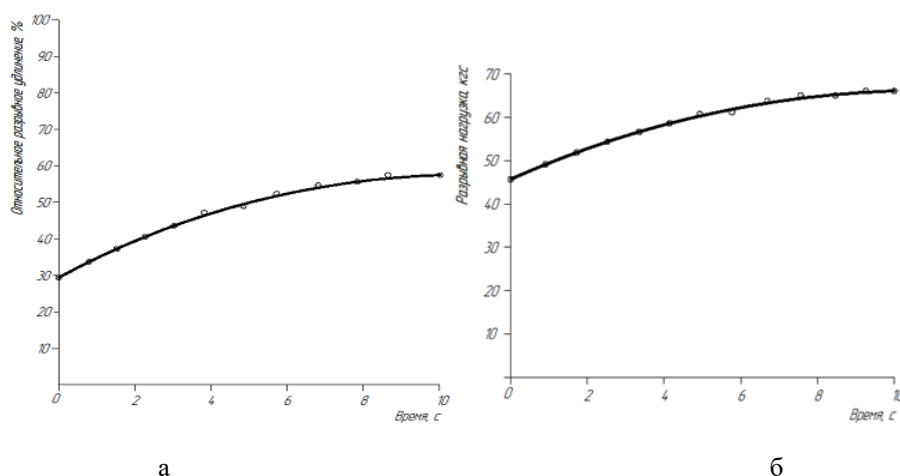


Рис. 8 – Результаты экспериментальных исследований изменения относительного разрывного удлинения и разрывной нагрузки поликапроамидных нитей от времени СВЧ обработки: а – относительное разрывное удлинение, б – разрывная нагрузка

В результате нетепловой СВЧ обработки поликапроамидных нитей в электротехнологической установке с камерой гибридного типа улучшились их технологические свойства: относительное разрывное удлинение нитей возрастало (рис. 8) на 48,2% (с 21,3 кгс до 31,6 кгс), разрывная нагрузка увеличилась на 27,6% (с 21,3 кгс до 27,6 кгс), по сравнению с необлученными образцами (без нагрева). Аналогичные изменения отмечали и другие исследователи, например, при СВЧ обработке ПКЕ нитей увеличивалась их фактическая линейная плотность [18].

**Выводы.** В результате одновременной обработки поликапроамидных нитей и

пиломатериалов в СВЧ электротехнологической установке с камерой гибридного типа время обработки пиломатериалов сокращается с 40 до 15 ч и улучшаются технологические свойства поликапроамидных нитей (относительное разрывное удлинение нитей увеличилось на 48,2%, разрывная нагрузка – на 27,6%).

**Сведения об источнике финансирования.** Работа выполнена в рамках гранта Республики Башкортостан в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых – кандидатов наук (шифр конкурса: НОЦ-ГМУ-2022).

#### Литература

1. Effect of Low Temperature Microwave Drying on Properties of Dyed Cashmere Fibers/ Z. Liuxiang, L. Wan, W. Gaojun, et al. // *Fibers and Polymers*. 2020. Vol. 21. P. 564–570. doi: 10.1007/s12221-020-9713-2.
2. Uperabsorbent polymers achieved by surface cross linking of poly (sodium acrylate) using microwave method/ M. Ghasri, H. Bouhendi, K. Kabiri, et al. // *Iranian Polymer Journal*. 2019. Vol. 28/ P. 539–548. doi: 10.1007/s13726-019-00722-6.
3. Strong mechanics and broadened microwave absorption of graphene-based sandwich structures and surface-patterned structures / W. Xi-Xi, S. Chao-Ming, W. Fu-Bao, et al. // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2018. Vol. 29. P. 9683–9691. doi: 10.1007/s10854-018-9005-4.
4. The vacuum-assisted microwave drying of round bamboos: drying kinetics, color and mechanical property/ H. Lv, X. Chen, X. Liu, et al. // *Mater Lett*. 2018. Vol. 223. P. 159-162. doi: 10.1016/j.matlet.2018.04.038.
5. Effects of microwave irradiation on the moisture content of various wood chip fractions obtained from different tree species / M. Aniszewska, K. Słowiński, E. Tulska, et al. // *Journal of Wood Science*. 2021. 67. Article number 28. URL: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1186/s10086-021-01958-8> (дата обращения: 21.10.24).

6. Development of Empirical Drying Correlations for Crushed Wood Chips and Crushed Wood Pellets / H. Rezaei, C. Lim, A. Lau, et al. // *Dry Technol.* 2017. Vol. 35. P. 1423-1432. doi: 10.1080/07373937.2016.1198912.
7. Nirmaan A.M.C., Rohitha Prasantha B.D., Peiris B.L. Comparison of microwave drying and oven-drying techniques for moisture determination of three paddy (*Oryza sativa* L.) varieties // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture.* 2020. Vol. 7. P. 2-7. doi: 10.1186/s40538-019-0164-1.
8. Сивяков Б.К. Установка СВЧ сушки сельскохозяйственных продуктов в фермерских хозяйствах // *Вопросы электротехнологии.* 2019. №1(22). С. 9-13.
9. Chaowalit M., Chitradee L., Laksana C. Convection combined microwave drying affect quality of volatile oil compositions and quantity of curcuminoids of turmeric raw material // *Revista Brasileira de Farmacognosia.* 2019. Vol. 29. P. 434-440. doi: 10.1016/j.bjp.2019.04.006.
10. Designed construction of composites with enhanced microwave absorption performance / T.S. Liu, N. Liu, Q.D. An, et al. // *J Alloys Compd.* 2019. Vol. 802. P. 445-457. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.06.243.
11. Microwave-assisted one-pot three-component polymerization of alkynes, aldehydes and amines toward amino-functionalized optoelectronic polymers / J. Tao, Z. Nan-nan, C. Wan-qing, et al. // *Chinese Journal of Polymer Science.* 2017. Vol. 35. P. 269-281. doi: 10.1007/s10118-017-1890-0.
12. Determining Shelf Life of Ready-to-Eat Macaroni and Cheese in High Barrier and Oxygen Scavenger Packaging Sterilized via Microwave-Assisted Thermal Sterilization / J. Patel, S. Al-Ghamdi, H. Zhang, et al. // *Food and Bioprocess Technology.* 2019. Vol. 12. P. 1516-1526. doi: 10.1007/s11947-019-02310-1.
13. Shelf-life modeling of microwave-assisted thermal sterilized mashed potato in polymeric pouches of different gas barrier properties / H. Zhang, Z. Tang, B. Rasco, et al. // *Journal of Food Engineering.* 2016. Vol. 183. P. 65-73. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.03.021.
14. Архангельский Ю.С., Колесников Е.В. Камеры с бегущей и со стоячей волной. Саратов: Буква, 2015. 232 с.
15. Девятков Н.Д. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1972. Т.2. 375 с.
16. Архангельский Ю.С., Колесников Е.В. Камеры лучевого типа. Саратов: Амирит, 2017. 198 с.
17. Пировских Е.А., Бегунков О.И., Бегункова Н.О. Рассмотрение результатов исследования процессов сушки пиломатериалов из лиственницы // *Международный научно-исследовательский журнал.* 2022. №4 (118). URL: <https://research-journal.org/archive/4-118-2022-april/rassmotrenie-rezultatov-issledovaniya-processov-sushki-pilomaterialov-iz-listvennicy> (дата обращения: 24.01.2024). - doi: 10.23670/IRJ.2022.118.4.015.
18. Архангельский Ю.С. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лавренев, С.К. Слепцова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. – 288 с.

**Сведения об авторе:**

Тухватуллин Мидхат Ильфатович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов, e-mail: midhat.tuhvatullin@mail.ru  
Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа, Россия.

**MICROWAVE ELECTRICAL TECHNOLOGICAL INSTALLATION FOR MICROWAVE PROCESSING OF TIMBER AND POLYCAPROMIDE THREADS**

**M. I. Tikhvatullin**

**Abstract.** Research was carried out to determine the optimal modes for the simultaneous processing of lumber and polycapromide threads in a hybrid microwave electrotechnological installation. The work was carried out on an installation with a hybrid-type chamber with adjustment of the microwave power level of the magnetrons and the duration of exposure. Two possible designs of a hybrid installation for processing lumber and polycapromide threads are presented, differing in that in one the lumber was processed inside the chamber, and the polycapromide threads were pulled through waveguides using bobbins and an electric motor installed outside the chamber, and in the second, both materials were processed inside the installation chamber. The object of research is lumber and polycapromide threads. Lumber was loaded into the working chamber in the form of a stack, which rotated along its axis, and a structure was examined in which polycapromide threads were pulled through a waveguide extending from a source of microwave energy outside the chamber. The time of exposure to microwave radiation on lumber and half-capromide threads was measured using electronic stopwatches; temperature and humidity were measured using a Testo 905T2 thermometer, a Testo 830T1 pyrometer, and a Testo 606-1 digital hygrometer. The use of a hybrid microwave electrotechnological installation reduced the processing time of lumber due to rotation in the microwave field to 15 hours, while ensuring the required quality of the dried material (final moisture content - 7.1%, reduction in chipping and impact bending strength within 5%). The relative breaking elongation of polycapromide threads increased by 48.2%, and the breaking load – by 27.6%. Thanks to the simultaneous processing of lumber and polycapromide threads, it is possible to reduce metal consumption and increase the energy efficiency of the installation.

**Key words:** microwave installation, hybrid chamber, thermal and non-thermal treatment, lumber, polycapromide filaments, magnetron.

**References**

1. Liuxiang Z, Wan L, Gaojun W. Effect of low temperature microwave drying on properties of dyed cashmere fibers. *Fibers and Polymers.* 2020; Vol.21. 564-570 p. doi: 10.1007/s12221-020-9713-2.
2. Ghasri M, Bouhendi H, Kabiri K. Uperabsorbent polymers achieved by surface cross linking of poly (sodium acrylate) using microwave method. *Iranian Polymer Journal.* 2019; Vol.28. 539-548 p. doi: 10.1007/s13726-019-00722-6.
3. Xi-Xi W, Chao-Ming S, Fu-Bao W. Strong mechanics and broadened microwave absorption of graphene-based sandwich structures and surface-patterned structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics.* 2018; Vol.29. 9683-9691 p. doi: 10.1007/s10854-018-9005-4.
4. Lv H, Chen X, Liu X. The vacuum-assisted microwave drying of round bamboos: drying kinetics, color and mechanical property. *Mater Lett.* 2018; Vol.223. 159-162 p. doi: 10.1016/j.matlet.2018.04.038.
5. Aniszewska M, Slowinski K, Tulska E. Effects of microwave irradiation on the moisture content of various wood chip fractions obtained from different tree species [Internet]. *Journal of Wood Science.* 2021; 67. Article number 28. [cited 2024, January 1]. Available from: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1186/s10086-021-01958-8>.
6. Rezaei H, Lim C, Lau A. Development of empirical drying correlations for crushed wood chips and crushed wood pellets. *Dry Technol.* 2017; Vol.35. 1423-1432 p. doi: 10.1080/07373937.2016.1198912.
7. Nirmaan AMC, Rohitha Prasantha BD, Peiris BL. Comparison of microwave drying and oven-drying techniques for



moisture determination of three paddy (*Oryza sativa* L.) varieties. Chemical and Biological Technologies in Agriculture. 2020; Vol.7. 2-7 p. doi: 10.1186/s40538-019-0164-1.

8. Sivyakov BK. [Installation of microwave drying of agricultural products on farms]. Voprosy elektrotekhnologii. 2019; 1(22). 9-13 p.

9. Chaowalit M, Chitradee L, Laksana C. Convection combined microwave drying affect quality of volatile oil compositions and quantity of curcuminoids of turmeric raw material. Revista Brasileira de Farmacognosia. 2019; Vol.29. 434-440 p. doi: 10.1016/j.bjp.2019.04.006.

10. Liu TS, Liu N, An QD. Designed construction of composites with enhanced microwave absorption performance. J Alloys Compd. 2019; Vol.802. 445-457 p. doi: 10.1016/j.jallcom.2019.06.243.

11. Tao J, Nan-nan Z, Wan-qing C. Microwave-assisted one-pot three-component polymerization of alkynes, aldehydes and amines toward amino-functionalized optoelectronic polymers. Chinese Journal of Polymer Science. 2017; Vol.35. 269-281 p. doi: 10.1007/s10118-017-1890-0.

12. Patel J, Al-Ghamdi S, Zhang H. Determining shelf life of ready-to-eat macaroni and cheese in high barrier and oxygen scavenger packaging sterilized via Microwave-Assisted Thermal sterilization. Food and Bioprocess Technology. 2019; Vol.12. 1516-1526 p. doi: 10.1007/s11947-019-02310-1.

13. Zhang H, Tang Z, Rasco B. Shelf-life modeling of microwave-assisted thermal sterilized mashed potato in polymeric pouches of different gas barrier properties. Journal of Food Engineering. 2016; Vol.183. 65-73 p. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.03.021.

14. Arkhangelskiy YuS, Kolesnikov EV. Kamery s begushchey i so stoyachey volnoy. [Cameras with traveling and standing waves]. Saratov: Bukva. 2015; 232 p.

15. Devyatkov ND. Tekhnika i pribory SVCh. [Microwave equipment and devices]. Moscow: Vysshaya shkola. 1972; Vol.2. 375 p.

16. Arkhangelskiy YuS, Kolesnikov EV. Kamery luhevogo tipa. [Beam type cameras]. Saratov: Amirit. 2017; 198 p.

17. Pirovskikh EA, Begunkov OI, Begunkova NO. [Consideration of the results of research into drying processes for larch lumber]. [Internet]. International Scientific Research Journal. 2022; 4 (118). [cited 2024, January 1]. Available from: <https://research-journal.org/archive/4-118-2022-april/rassmotrenie-rezultatov-issledovaniya-processov-sushki-pilomaterialov-iz-listvennicy>. - doi: 10.23670/IRJ.2022.118.4.015.

18. Arkhangelskiy YuS, Grishina EM, Lavrentev VA, Sleptsova SK. SVCh modifikatsiya polimerov. [Microwave modification of polymers]. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t. 2012; 288 p.

**Author:**

Tukhvatullin Midkhat Ilfatovich – Ph.D. of Technical Sciences, associate professor of the Department of Power Supply and Automation of Technological Processes, e-mail: [midhat.tuhvatullin@mail.ru](mailto:midhat.tuhvatullin@mail.ru)  
Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia.