

Д. Л. Рахманкулов, С. Ю. Шавшукова, И. Н. Вихарева  
**Применение микроволнового излучения  
для сушки дерева и пиломатериалов**

НИИ малотоннажных химических продуктов и реактивов  
Уфимского государственного нефтяного технического университета  
450029, г. Уфа, ул. Ульяновых, 75; тел. (347)2431712

С целью обобщения возможностей использования микроволнового излучения в промышленных процессах рассмотрены и проанализированы различные методы сушки древесины. Обоснованы технологические и экономические преимущества сушки древесины в электромагнитном поле сверхвысокой частоты. Рассмотрены возможности комбинирования СВЧ сушки с другими известными способами, приведены примеры сушилок с СВЧ нагревом.

**Ключевые слова:** микроволновый нагрев, СВЧ сушка, диэлектрик, конвейерный тип, резонаторный тип, древесина, пиломатериалы.

Высокая скорость и эффективность нагрева диэлектриков микроволновым излучением позволяют использовать энергию микроволн для нагревания и высушивания практически любых содержащих влагу материалов <sup>1</sup>. Так, микроволновое излучение еще в 1960-х гг. начали применять в промышленных масштабах для тепловой обработки и высушивания пищевых продуктов, в т. ч. плодов, ягод, грибов и др. <sup>2</sup>. Использование микроволнового нагрева показало высокую эффективность для сушки таких химических продуктов, как соли и оксиды металлов и др. <sup>3, 4</sup>. Разработаны и эксплуатируются микроволновые установки специфического назначения, например, для сушки проявленной киноплёнки <sup>5</sup>, а также универсальные микроволновые сушилки для нагрева и высушивания разных диэлектрических материалов <sup>6</sup>.

Необходимость высушивания древесины и пиломатериалов перед их дальнейшим использованием привела к созданию сушильных установок различного типа, и способ микроволновой сушки показал свою эффективность и в данном производстве. Сушка древесины заключается в удалении влаги путем испарения. Механические методы обезвоживания не применимы к древесине. Ротационное и ультразвуковое обезвоживание недостаточно снижают влажность древесины до уровня 42–48 % <sup>7</sup>.

Из всего спектра электромагнитных волн для нагрева и сушки древесины применяют в основном электрические колебания промышленной частоты (индукционный нагрев), радиоволны высоких и сверхвысоких частот (диэлектрический или микроволновый нагрев) и инфракрасное излучение (инфракрасный нагрев) <sup>8</sup>.

*Индукционный нагрев* — это нагрев токопроводящих тел за счет возбуждения в них электрических токов переменным электромагнитным полем. Источниками электромагнитного поля служат индукторы. Для сушки древесины применяется промышленная частота 50 Гц. Процесс индуктивной сушки заключается в следующем: штабель пиломатериалов с уложенными между рядами досок ферромагнитными элементами помещают в электромагнитное поле промышленной частоты, образованное во внешнем по отношению к штабелю индукторе-соленоиде. Ферромагнитные элементы передают тепло древесине путем непосредственного контакта. Созданный температурный перепад в штабеле интенсифицирует процесс сушки в два раза по сравнению с камерной сушкой. Недостаток этого вида сушки состоит в невысоком качестве высушенного материала, что связано с большой неравномерностью нагрева, местными перегревами, большими внутренними напряжениями. Себестоимость индуктивной сушки в два раза выше себестоимости известной камерной сушки.

*Инфракрасный нагрев* — это нагрев материалов электромагнитным излучением с длиной волны 2 мм — 760 нм. Этот вид нагрева основан на свойстве материалов поглощать данную часть спектра излучения. Инфракрасные излучатели, состоящие из источника энергии и отражателя, обеспечивают глубинный или поверхностный нагрев облучаемого тела или, при необходимости, локальную сушку объекта. Данный вид сушки древесины широкого распространения не получил в связи с низкой степенью проникновения инфракрасных волн в объект.

Дата поступления 29.01.08

*Микроволновый нагрев\** (диэлектрический, СВЧ нагрев) основан на проникновении электромагнитной энергии в материал и преобразовании ее в тепловую энергию. Проникновение электромагнитной энергии в материал происходит мгновенно. Ее поглощение составляющими материала происходит по-разному, в зависимости от их диэлектрических свойств. Распределение тепловой энергии в материале происходит иначе, чем при тепловой обработке — максимум температуры находится в середине тела.

Создаваемое при этом распределение температуры в теле материала создает наиболее благоприятные условия для ускорения диффузии пара из внутренних слоев материала к периферийным, так как все три градиента (температура, давление, концентрация), определяющие скорость диффузии, направлены в одну сторону. В итоге уменьшаются энергетические затраты на осуществление процесса, сокращается его продолжительность.

Интенсификация процесса сушки древесины является одним из перспективных направлений использования энергии микроволн (СВЧ).

Как видно из формулы (1), теплота, выделяемая в древесине под действием электромагнитного поля, зависит от частоты и напряженности поля, а также от диэлектрических параметров древесины<sup>7</sup>:

$$p = 0.55 \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot E^2 \cdot 10^{-12} \quad (1)$$

где  $p$  — удельная мощность, Вт/см<sup>3</sup>;  
 $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  
 $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла потерь или коэффициент потерь;  
 $E$  — напряженность электрического поля (градиент напряжения), В/см;  
 $f$  — частота тока, Гц.

Частота тока для источника СВЧ энергии является постоянной величиной, напряженность электрического поля зависит от исходной мощности источника. Для промышленных нагревательных устройств в России выделены следующие диапазоны частот: 433 МГц, 915 МГц, 2450 МГц. Выбор частоты определяется характеристиками подлежащего нагреву материала<sup>9</sup>.

Электрическая характеристика диэлектрика (древесины) определяется диэлектрической проницаемостью материала  $\varepsilon$  и тангенсом

угла потерь  $\operatorname{tg} \delta$ . Величины  $\varepsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  зависят от строения древесины, ее влажности, а также от частоты, направления тока и других факторов. Произведение диэлектрической проницаемости на тангенс угла потерь ( $\varepsilon' = \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ ) называется коэффициентом диэлектрических потерь и характеризует свойства материала при высокочастотном нагреве.

Избирательность СВЧ нагрева при сушке древесины заключается в том, что с уменьшением влажности древесины в процессе уменьшается выделяемая в древесине теплота. Проникая в древесину, напряженность электрического поля затухает по экспоненте (2):

$$E = E_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

где  $E_0$  — напряженность на поверхности древесины, В/см;  
 $e = 2,7$  — основание натурального логарифма;  
 $\alpha$  — коэффициент затухания волны;  
 $x$  — расстояние от поверхности древесины до точки, на которой определяется напряженность, см.

Из рис. 1<sup>7, 10</sup>, на котором изображена зависимость напряженности электрического поля от глубины проникновения СВЧ поля в древесину при разных частотах, видно, что наиболее приемлемыми для сушки древесного сырья являются частоты 433 МГц и 915 МГц. Частоту 2450 МГц, на которой работают бытовые микроволновые печи, целесообразно использовать для сушки тонких материалов, например единичных досок.

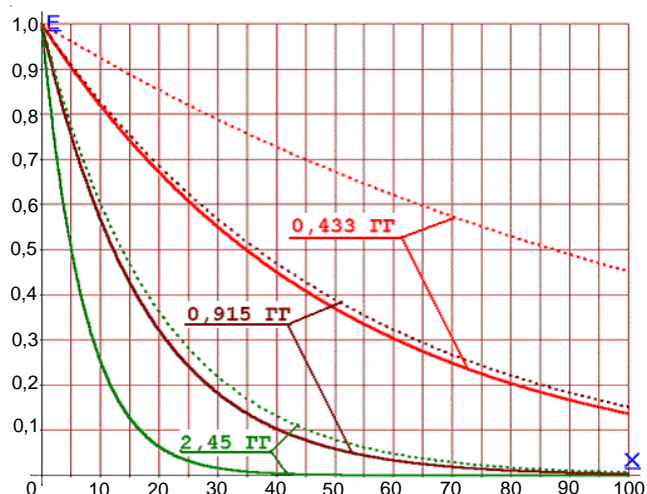


Рис. 1. График зависимости напряженности электрического поля от глубины проникновения СВЧ поля в древесину при разных частотах. Сплошная линия при влажности древесины 30%, пунктирная линия при влажности древесины 10%.  $E_0 = 1$

\* Микроволновый диапазон включает волны 300 МГц–30 ГГц.

При СВЧ сушке древесины энергия подводится волноводными трактами в камеру с пиломатериалами. Волноводы представляют собой полые трубы прямоугольного или круглого сечения. Источником СВЧ энергии является магнетрон. Сушильные камеры для СВЧ сушки комплектуются одним или несколькими магнетронами.

Важным преимуществом СВЧ нагрева является возможность осуществления и практического применения избирательного, равномерного, сверхчистого, саморегулирующегося видов нагрева обрабатываемого материала <sup>8</sup>.

*Равномерный объемный нагрев.* С помощью СВЧ энергии можно не только равномерно нагревать диэлектрик по его объему, но и получать по желанию любое заданное распределение температур.

*Избирательный саморегулирующийся нагрев.* С уменьшением влажности в процессе сушки потери СВЧ энергии уменьшаются, а нагрев продолжается только в участках обрабатываемого материала с повышенной влажностью.

Основным недостатком СВЧ сушки является то, что из-за большой концентрации в сучках смолы она вытекает из сучка.

Преимущества применения СВЧ энергии для сушки древесины следующие <sup>10</sup>:

– высокая концентрация энергии в единице объема при сравнительно малых значениях напряженности электрического поля ( $P_v \sim fE^2$ ) и соответственно быстрый объемный нагрев объекта;

– высокая степень поглощения древесинной энергии СВЧ поля (за счет влажности древесины);

– возможность с высокой скоростью подвести и выделить в единице объема древесины мощность, не доступную ни одному из традиционных способов подвода энергии;

– осуществление бесконтактного избирательного нагрева и получение требуемого распределения температур в древесине, в том числе в режиме саморегулирующегося нагрева;

– КПД преобразования электромагнитной энергии в теплоту, выделяемую в объекте нагрева, близок к 100%; низкие потери энергии в подводящих трактах и рабочих камерах;

– диэлектрический нагрев позволяет создавать такие виды распределения источников теплоты в нагреваемых объектах, которые неосуществимы при обычном нагреве;

– возможность использовать в сушке древесины заложенные природой механизмы транспортировки больших объемов жидкости вдоль волокон.

За последние десятилетия накоплен значительный опыт разработки и эксплуатации сушильных установок с использованием СВЧ энергии. Многие из сушильных установок сочетают микроволновый нагрев с конвективной или вакуумной сушкой <sup>11</sup>.

Применяют два вида СВЧ установок для сушки древесных материалов <sup>9</sup>.

**Установки резонаторного типа** целесообразно использовать в качестве сушилок периодического действия.

**Установки с бегущей волной** идеально подходят для сушилок на поточной линии. В этом случае нагрузка и передающая линия дополняют друг друга, образуется линия с потерями, используемыми для сушки материалов. Такую линию можно представить как каскадное включение отдельных секций.

**Сушилки резонаторного типа периодического действия** предназначены для экстренной сушки небольших объемов твердых и ценных пород древесины. Сушилки этого типа сложны по конструкции и имеют высокую стоимость. Расчеты и экспериментальные данные показывают: для улучшения равномерности сушки штабеля древесины необходим ввод нескольких независимых (некогерентных) сравнительно маломощных СВЧ генераторов в камеру. В зависимости от частоты и способа облучения, геометрических и диэлектрических характеристик штабеля древесины можно создать практически равномерное распределение микроволновой энергии по всему объему материала и получить продукцию высокого качества. Камеры СВЧ сушилок не позволяют высушивать большие объемы древесины по причине затухания электромагнитного поля, что приводит к снижению экономичности процесса сушки.

В процессе СВЧ сушки пилломатериалов выделяемая теплота расходуется на нагрев влажной древесины до температуры кипения воды в древесине и на испарение влаги внутри нее. С началом кипения воды внутри древесины повышается избыточное давление. Это приводит к потере прочности и целостности и, соответственно, к разрыву клеточных оболочек. Поскольку структура древесины анизотропна \*\*, влагопроводность ее вдоль и поперек

\*\* **Анизотропия** – свойство материала, имеющего различные физико-химические характеристики по различным направлениям.

волокон по сравнению с низкотемпературной конвективной сушкой выше в 10–15 раз. При использовании СВЧ сушки древесины березы это различие составляет 16000 раз, поэтому при СВЧ сушке пиломатериалов под действием избыточного давления основная масса влаги удаляется через торцы. При этом вода удаляется не только в виде пара, но и в жидкой фазе, что уменьшает затраты энергии на сушку <sup>7</sup>.

Использовать комбинированную СВЧ сушку пиломатериалов с вакуумной и конвективной сушкой весьма целесообразно, так как при этом наряду с высокой скоростью достигается высокое качество высушенных пиломатериалов. Перепад влажности по толщине составляет не более 3.0–3.5 %, условный показатель остаточных напряжений – не более 1–2 %. При этом удельная подводимая мощность энергии не должна превышать 0.1 Вт/см<sup>3</sup> <sup>12</sup>.

В инженерном центре «СЭМТО» разработан и изготовлен ряд модификаций вакуумных сушильных камер с нагревом древесины электромагнитным полем, формируемым системой СВЧ генераторов с постоянным или цикличес-

ким вакуумированием. Одна из таких установок используется на ОАО «Карандашная фабрика имени Красина» (табл. 1) для сушки карандашных заготовок из кедра и липы до показателя конечной влажности  $W_k = 4–6\%$  <sup>12</sup>.

Группа ученых Белорусского государственного университета разработала комбинированный способ сушки древесины, сочетающий нагрев в СВЧ поле с конвективной сушкой. Регулирование процесса производится автоматически, что обеспечивает высокое качество высушенного материала и высокую производительность процесса сушки. Установка состоит из рабочей камеры, микроволновых модулей (2–6), тепловентиляторов (2–10), вытяжного вентилятора (1–2) и пульта управления. Оборудование мобильно и не требует дополнительных вложений в коммуникации. К достоинствам такого типа сушилок можно отнести малое потребление электроэнергии, короткие сроки окупаемости, высокое качество сушки, а также упрочнение древесины в процессе сушки до 60% (табл. 2) <sup>12</sup>.

Так, продолжительность процесса сушки дуба толщиной 60 мм естественной влажности

Таблица 1

**Характеристики СВЧ установки вакуумной сушки на ОАО «Карандашная фабрика имени Красина» (Москва)**

Длина рабочей камеры, м	Диаметр рабочей камеры, м	Количество генераторов, шт.	Установленная мощность, кВт	Средняя потребл. мощность, кВт	Рекомендуемый объем загрузки, м <sup>3</sup>	Продолжительность, м <sup>3</sup> /мес.	
						Хвойный п/м толщ. до 55 мм	Дубовый п/м толщ. до 35 мм
4.4	1.5	16	30.8	17.9	1.0	25	10
4.4	1.5	28	44.4	19.3	1.0	30	12
4.9	2.0	32	53.1	21.7	1.5	45	18
7.0	2.0	44	69.2	30.2	2.1	60	24

Таблица 2

**Технические характеристики сушильных камер БелГУ (Минск) <sup>12</sup>**

Наименование показателя	КРЭС-1	КРЭС-2	КРЭС-7	КРЭС-10	КРЭС-15	КРЭС-20						
Внутренние размеры камеры, мм	850 × 850	850 × 850	1700 × 1700	1700 × 1700	1700 × 1700	1700 × 1700						
Объем камеры, м <sup>3</sup>	1.2	1.8	7.3	9.8	13.3	19.6						
Снижение влажности	1.5 – 6 % в сутки в зависимости от толщины и сорта древесины											
Макс. потребляемая мощность, кВт · ч	3	3–5	6–8	8–10	9–12	10–14						
Масса, кг	500	600	950	1300	1700	2500						
Ориентировочная цена EXW, USD	2850	3350	5100	5400	6800	9800						
Затраты электроэнергии на сушку материала, кВт · ч/м <sup>3</sup>												
							– бук, дуб, ясьень					
							– ольха, осина					
							– сосна, ель					

не превышает 30 сут. Мягкие лиственные породы можно высушить в 2, а хвойные – в 3–4 раза быстрее.

**Сушильные установки с бегущей волной (сушилки конвейерного типа):**

– сушилки согласного типа (concurrent), в которых поток электромагнитного поля и направление движения материала совпадают;

– противоточные, встречные сушилки (countercurrent), в которых поток электромагнитного поля и движение материала направлены навстречу друг другу;

– сушилки с перекрестным движением (crosscurrent), в которых направление движения материала и поток электромагнитного поля перпендикулярны друг другу.

При проектировании сушилок данного типа необходимо получить максимально возможную величину поглощения электромагнитной энергии и обеспечить реализацию заданного (оптимального) процесса сушки для высушивания древесины разных пород с любым значением влажности.

Реализовать оптимальный режим сушки позволяет цикличность процесса, поскольку в паузах между циклами происходит равномерное распределение прироста внутренней энергии и энергии испарения влаги внутри древесины. Это способствует снижению растрескивания и коробления.

Важным преимуществом СВЧ сушки является экологичность процесса, так как отсутствуют стоки и вредные газовые выбросы.

Важным преимуществом конвейерных сушилок является возможность полной автоматизации процесса сушки.

Экспериментальная серия сушилок непрерывного продвижения материала через сушильную камеру «МС» показала хорошие результаты при эксплуатации, обеспечив снижение себестоимости сушки в 4–5 раз по сравнению с конвективными сушильными камерами.

Малогабаритная СВЧ сушилка МС-3 производительностью 3 м<sup>3</sup> в сут. ( $W_H = 38$  до  $W_K = 8\%$ ) может работать как в проходном режиме с неограниченной длиной пиломатериала сечением 500 × 160 мм (доска, брус, кругляк), так и в периодическом режиме для лесоматериалов малой длины (1500 мм и менее: столярные детали, паркет и т. д.). При сушке хвойной древесины при  $t > 100$  °С происходит выделение смолы, сбор ее на поддоне для дальнейшей утилизации. Техническая характеристика сушилки МС-3 приведена в табл. 3<sup>12</sup>.

Использование сушилки МС-3 позволяет подавать высушенную древесину в необходи-

мых объемах непосредственно на дальнейшую обработку, что исключает загромождение площадей цеха сухой древесиной при использовании крупногабаритных конвекционных сушилок.

Таблица 3

**Техническая характеристика сушилки МС-3**

Пиломатериал, подвергаемый сушке	сосна, дуб, береза, бук, ясень
Длина пиломатериала при непрерывной сушке	не ограничена
Сечение пиломатериала при непрерывной сушке (макс)	160 × 500 мм
Скорость подачи при непрерывной сушке, м/мин	0.28–2
Длина пиломатериала при периодической сушке, м	1.5
Объем единовременной загрузки, м <sup>3</sup>	0.1
Продолжительность сушки (периодической), мин	30–60
Максимальная влажность древесины, % до	60
Конечная влажность (минимальная), %	8
Температура сушки, °С	80–120
Максимальная потребляемая мощность, кВт	15
Средняя потребляемая мощность, кВт	12
Удельный расход эл. энергии, кВт · ч/м <sup>3</sup>	140
Напряжение питания, В	220/380
Вес сушилки, кг	310
Габариты сушилки, м	2.4 × 0.8 × 1.6
Время непрерывной работы в сутки, ч	24
Обслуживающий персонал, оператор	1
Цена в стандартном исполнении оборудования (объем м <sup>3</sup> ), тыс. Евро	16

Независимо от исходной влажности древесины за один проход пиломатериала через сушильную камеру с малой скоростью возможно высушить древесину до 8%. Но лучших результатов можно достичь при сушке в 2–4 прохода. Выбор режима сушки осуществляется оператором на основе опытных данных по сушке древесины данных пород и технологической карты. Режим сушки устанавливается скоростью подачи пиломатериала и количеством включенных магнетронов. Наивысшая производительность достигается при подключении нескольких магнетронов.

Разработан уникальный способ СВЧ сушки оцилиндрованного бревна без трещин<sup>13</sup>, при котором в первую очередь высыхает центральная зона, затем поверхностные слои.

При воздействии СВЧ излучения энергия со специальной антенны, попадая на торец влажного бревна, практически полностью распространяется внутри него. Учитывая, что влажное бревно имеет большие диэлектрические потери, проходящее внутри древесины СВЧ излучение полностью поглощается древесиной. Происходит быстрое высыхание бревна со стороны торцов. Так как сухая древесина имеет меньшие коэффициенты диэлектрических потерь, проходящее внутри древесины излучение практически не поглощается древесиной, а распространяется вокруг бревна, и процесс сушки идет от торцов бревна к его центральной части по длине и, вследствие транспортирования СВЧ энергии, вдоль бревна к более влажным зонам. Таким образом, высушенная часть бревна является диэлектрическим волноводом для транспортирования СВЧ энергии.

Удаление части влаги в виде пара через свободную от влаги капиллярную систему древесины обеспечивает ее «пропаривание», т. е. влаготепловую обработку, при которой происходит снятие остаточных напряжений, следовательно, уменьшается проявление внутренних и внешних повреждений в пиломатериале, улучшается качество получаемой продукции.

Таким образом, при СВЧ сушке бревен получается готовая продукция, ничем не уступающая клееному брусу, стоимостью в 2–3 раза ниже стоимости клееного бруса. Стоимость оборудования при использовании предложенного способа в 3 раза меньше по сравнению с оборудованием для производства клееного стенового бруса. Данная технология может применяться для размораживания пиловочного сырья перед лесопилением, а также для пропаривания древесины собственной влагой в производстве шпона и фанеры.

Помимо сушки древесины процесс диэлектрического нагрева СВЧ полями используют в мебельной промышленности для склеивания фанеры <sup>14</sup>.

На установке, показанной на рис. 2а, склеиваемые куски дерева нагреваются в СВЧ поле коаксиального резонатора. При этом поле концентрируется в склеиваемом слое над специальным выступом, связанным с внешним проводником резонатора. Для склеивания больших поверхностей применяют метод облучения (рис. 2б). СВЧ излучение с помощью рупорной антенны и линзы фокусируется в пятно, имеющее размеры порядка половины длины волны. Чтобы устранить отражения от поверхности облучаемой диэлектрической среды, эта поверхность покрыта слоем толщиной  $\lambda/4$  с подходящей диэлектрической постоянной.

При СВЧ сушке необходимо защищать древесину от возможного перегрева наиболее влажных внутренних слоев. Эта задача решается выбором соответствующего режима сушки, температура сушки древесины в процессе не должна превышать для хвойных пород 100 °С, для березы и дуба соответственно 90 °С и 70 °С. Следует отметить, что СВЧ установки относительно мало энергоемки. Расход энергии на сушку одного кубометра пиломатериалов хвойных пород составляет 65 кВт/ч и менее (в зависимости от сечения), для березы – 88 кВт/ч, для дуба – 130 кВт/ч и менее <sup>15</sup>.

При использовании СВЧ сушилок периодического действия необходимо избегать возникновения эффекта стоячей волны для обеспечения равномерного облучения штабеля. По этой причине возникает потребность применения большого числа независимых (некогерентных) СВЧ генераторов, которые располагают с двух сторон от штабеля, емкость данной камеры мала (не более 3–5 м<sup>3</sup>). Максимальная ширина штабеля при частоте 460 МГц – 500 мм, при 2450 МГц – 110 мм. При этом предъявляются определенные требования к регламенту укладки штабеля, расположению шпаций, к толщине прокладки.

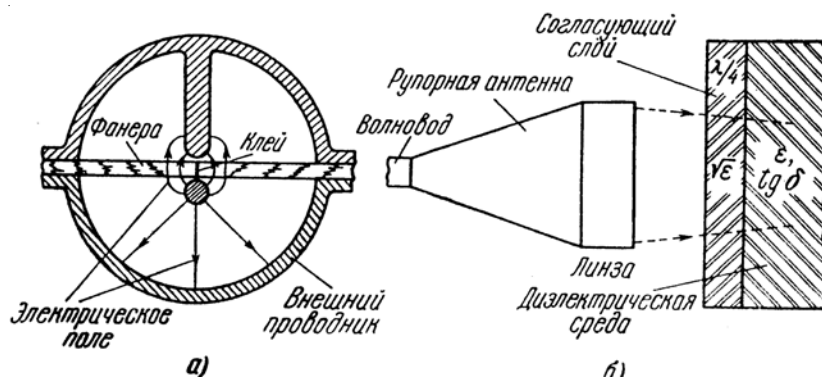


Рис. 2. Склеивание дерева за счет диэлектрического нагрева: а – резонансный метод; б – метод облучения.

Следует отметить, что при сушке пиломатериалов в целях достижения оптимального регулируемого процесса сушки и эффективно-го использования падающей мощности следует применять систему параллельно разветвленных волноводов с многорядным движением досок. Эффективность процесса будет выше, если скорости досок в каждом ряду будут дифференцированы. Этот фактор существенно усложняет сушильную установку и регулирование процесса сушки.

Редкость применения автоматического управления процессом сушки при СВЧ нагреве объясняется сложностью контроля температуры и влажности древесины в процессе сушки. Попытка решить эту проблему сделана для сушилки с параллельно разветвленными вол-

новодами и многорядным движением досок. Энергетическая эффективность процесса СВЧ сушки характеризуется величиной расхода энергии на сушку 1 м<sup>3</sup> древесины. Величина эта зависит от ряда условий, при которых происходит процесс сушки: от начальной и конечной влажности, условной плотности древесины (породы), режима сушки, герметичности и теплоизоляции ограждений камеры.

В заключение целесообразно привести ряд экономических показателей (по данным Санкт-Петербургской Торгово-промышленной палаты) для различного типа камер, предназначенных для сушки 1 м<sup>3</sup> пиломатериалов хвойных пород (табл. 4), которые свидетельствуют о преимуществах использования СВЧ сушилок.

Таблица 4

**Экономические показатели сушильных камер различного типа для сушки пиломатериалов**

Тип камеры	Себестоимость, руб.	Энергопотребление, кВт/ч	Цена установки, тыс. руб.	Окупаемость
Конвекционная «TekmaWood»	520	155	2480	2.4
Аэродинамическая КАС-20	840	310	535	3.0
Термодинамическая «Балтиком»	1650	190	210	—
Вакуумная «Вуд-Майзер»	520	155	1800	3.0
СВЧ установка, длина 3.3 м	380	65	700	Менее года

**Литература**

1. Рогов И. А., Некрутман С. В. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов.— М.: Пищевая промышленность, 1986.— 351 с.
2. Janos B. // Drying Technol.— 1999.— V. 17.— № 7–8.— Р. 1339.
3. Бикбулатов И. Х., Даминев Р. Р., Шарипова Э. Б., Шулаев Н. С., Шулаев С. Н. / Изв. вузов, ХИХТ.— 1999.— Т.42, вып. 2.— С. 135.
4. Рахманкулов Д. Л., Бикбулатов И. Х., Шулаев Н. С., Шавшукова С. Ю. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов.— М.: Химия, 2003.— 220 с.
5. Розенталь Ф. А., Виноградова Н. А., Полонская Ф. М. и др. // Техника кино и телевидения.— 1974.— № 4.— С. 38.
6. Патент на изобретение № 2111631. / Вергасов А. А. Универсальная сверхвысокочастотная сушильная установка (варианты). // Б. И.— 1998.— № 14.
7. СВЧ технологии в деревообработке. <http://www.svch-tehnologii.ru/> Новая технология сушки бревен и бруса.
8. Гареев Ф. Х. Сушка древесины электромагнитными волнами // Лесная промышленность.— 2004.— № 9.— С. 74.
9. Тетерин Л. А., Паничев Г. П. Процесс сушки лесоматериалов с применением энергии СВЧ // Окна. Двери. Витражи.— 2006.— № 5.
10. Гареев Ф. Х. Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // Лесная промышленность.— 2004.— № 1.— С. 50.
11. Гареев Ф. Х. Нетрадиционная сушка древесины: вакуумная и СВЧ // Лесная промышленность.— 2004.— № 5.— С. 63.
12. Тетерин Л. А., Паничев Г. П. Процесс сушки лесоматериалов с применением энергии СВЧ // Окна. Двери. Витражи.— 2006.— № 6.
13. Гареев Ф. Х. Сушка бревен без трещин // Лесная промышленность.— 2004.— № 4.— С. 58.
14. Клиnger Г. Г. Сверхвысокие частоты. Основы и применения техники СВЧ.— М.: Наука, 1969.— 238 с.
15. <http://www.spbcc.ru/> Оборудование для СВЧ сушки пиломатериалов.