

Использование энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ) является одним из методов по интенсификации процесса сушки древесины. При этом имеют место следующие процессы. В результате быстрого повышения температуры внутри древесины, что характерно для СВЧ-нагрева, повышается давление водяных паров, то есть появляется избыточное давление пара внутри древесины по отношению к давлению среды. Градиент избыточного давления резко интенсифицирует процесс сушки, так как перенос пара происходит как путем молекулярной диффузии, так и путем фильтрации через поры и капилляры древесины.

ГАРЕЕВ Фаузат Хамитович,
к. т. н.,
ведущий научный сотрудник
Научно-технического центра «ПИК»

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СВЧ-СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

ПЯТЬ «ПЛЮСОВ» СВЧ И «МИНУСЫ» ИХ ОСВОЕНИЯ

Основные преимущества применения СВЧ-энергии для сушки древесины таковы:

1) высокая степень поглощения древесиной энергии электромагнитного поля СВЧ (за счет того, что древесина – влажный материал);

2) возможность со скоростью света подвести и выделить в единице объема древесины мощность, не доступную ни одному из традиционных способов подвода энергии;

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

4) практически 100% КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую, выделяемую в нагреваемом материале, низкие потери энергии в подводящих трактах и рабочих камерах;

5) возможность мгновенного включения и выключения теплового воздействия, что обеспечивает режим тепловой безынерционности и высокую точность регулирования нагрева.

В последние 10–15 лет с развитием техники генерирования токов СВЧ многие предприятия пытались создать СВЧ-установки для сушки пиломатериалов. Но эти разработки не принесли желаемых результатов. В настоящее время не разработана СВЧ-установка для сушки древесины, которая в полной мере обеспечивала бы качественную и скоростную сушку. И произошло это по следующим причинам.

В разрабатываемых сушильных камерах применялись маломощные магнетроны от бытовых СВЧ-печей, работающие на частоте 2,45 ГГц, что неприемлемо для сушки пакета пиломатериалов. В этом случае глубина проникновения СВЧ-энергии в древесину составляла не более 10 см (см.

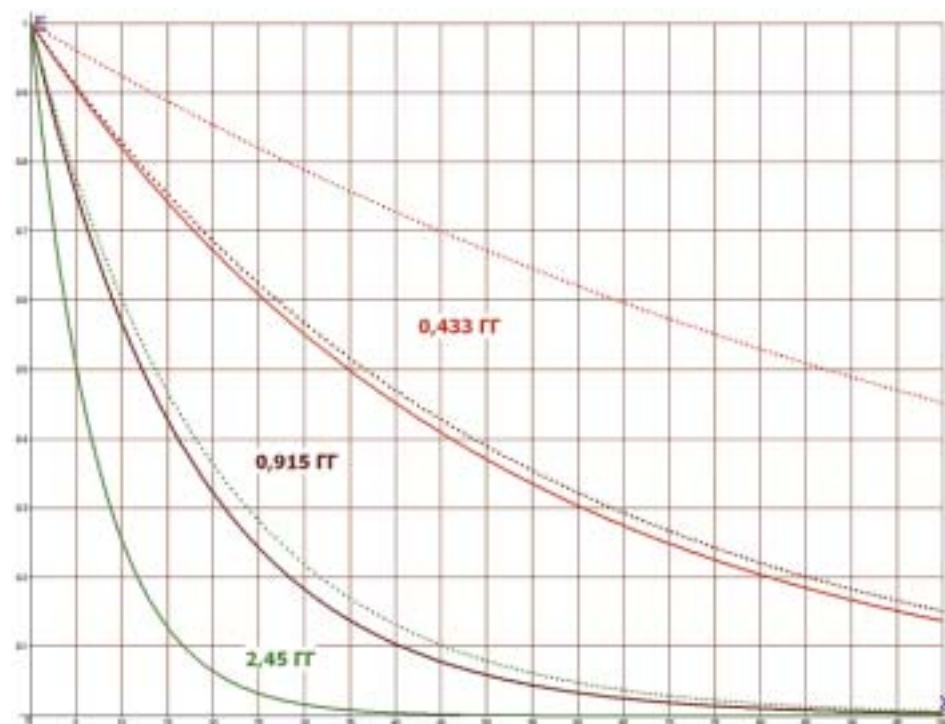
график) и сушка штабеля пиломатериалов происходила только за счет постепенного изменения диэлектрических свойств древесины в процессе сушки; не использовалось главное преимущество СВЧ процесса – равномерный объемный нагрев древесины.

Из-за конструктивных недоработок происходили локальные перегревы пиломатериалов и возгорание древесины даже при малых удельных мощностях. Падающая на древесину СВЧ-волна не только поглощается древесиной, но и образует поверхностные волны. Они распространяются как вдоль штабеля, так и вдоль прокладок, что приводит к концентрации СВЧ-энергии в определенных точках штабеля и перегреву древесины. По этой причине невозможно поднять удельную мощность

до расчетного уровня, что приводит к увеличению срока сушки древесины и, соответственно, к увеличению затрат энергии на сушку.

Ожидаемого эффекта не дало и комбинирование конвективной сушки с СВЧ-сушкой древесины. СВЧ-энергия применялась для интенсификации конвективной сушки древесины, однако при этом происходили взаимоисключающие процессы. СВЧ-сушка древесины происходит в основном при температурах внутри древесины свыше 100°C. А конвективная сушка происходит при температурах 60–80°C. Получается, что древесина одновременно нагревалась дорогой СВЧ-энергией и охлаждалась мощным потоком сушильного агента, что приводило к увеличению затрат на сушку древесины.

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%.



Предпринимались и попытки создания конвейерных СВЧ-установок для сушки длинномерных пиломатериалов. Однако в этом случае имела место неравномерная сушка пиломатериалов, т.к. облучение их СВЧ-энергией происходило не одновременно, а большая проницаемость древесины вдоль волокон приводила к фильтрации влаги от влажных зон к высушенным зонам пиломатериала.

И, пожалуй, самый существенный недостаток: ни в России, ни за рубежом не удалось создать альянс между теми, кто производит СВЧ-оборудование, и теми, кто разрабатывает технологический процесс сушки древесины на таком оборудовании. Попытки производителей СВЧ-оборудования наладить выпуск сушильных камер самостоятельно, без участия специалистов по деревообработке, привели лишь к тому, что у потребителей создалось стойкое негативное отношение к такому оборудованию.

К сожалению, попытки создания именно таких сушильных камер продолжают до сих пор. Известны производители сушильных камер, применившие частоты, подходящие для древесины,

но и им не удалось избежать ошибки в виде полного непонимания процесса СВЧ-сушки древесины. А она состоит в следующем: многие специалисты по сушке древесины применяют к СВЧ-сушке тот же подход, что и к конвективной, т.е. рассматривают древесину как пассивный материал. Однако в процессе СВЧ-сушки древесина проявляет свойства активного материала, выполняющего роль диэлектрического волновода.

Сушка древесины токами СВЧ является очень сложным процессом и находится на стыке нескольких наук. Только комплексное решение поставленной задачи при объединении таких наук, как электродинамика (распространение электромагнитных волн в волноводных трактах и в диэлектрических материалах), техническая термодинамика (фазовые переходы, основные термодинамические процессы), гидравлика (фильтрация пара и воды через пористые материалы), техническая гидродинамика древесины (статистическая механика водопроводящей структуры древесины, гидродинамика древесных капилляров) позволит получить положительные результаты.

РАСХОД ЭНЕРГИИ ПРИ СВЧ-СУШКЕ

По известным информационным данным, расход энергии на СВЧ-сушку составляет от 100 до 900 кВт/м³. Некоторые производители СВЧ-камер указывают диапазон от 100 до 200 кВт/м³. Правда, они при этом умалчивают, от какой исходной влажности до какой заданной влажности были высушены пиломатериалы. Верхние пределы (600–900 кВт/м³) называют противники СВЧ-сушки древесины и производители других видов сушильных камер.

Рассмотрим, что же происходит на самом деле.

В таблице 1 показаны расчетные удельные расходы СВЧ-энергии и сетевой электроэнергии на сушку свежесрубленной древесины разных пород до влажности 12%.

Как видно из приведенных данных, расход сетевой энергии на сушку свежесрубленной древесины до влажности 12% составляет для разных пород от 301,2 до 366,4 кВт/м³. Заметим, что в реальности в сушильную камеру древесина поступает с влажностью

Таблица 1. Расход СВЧ-энергии и сетевой электроэнергии на сушку древесины

Наименование	ПОРОДА						
	Береза	Бук	Дуб	Сосна	Ель	Кедр	Осина
Свойства древесины							
Плотность базисная	520	560	570	415	365	360	410
Влажность свежесрубленной дрв.	78	64	70	85	91	109	82
Теплоемкость абс. сухой дрв.	1,55 кДж/кг						
Свойства воды							
Скрытая теплота испарения воды	2260 кДж/кг						
Объем воды в древесине, л.							
в 1 м ³ свежесрубленной дрв.	406	358	399	353	332	392	336
при W=12% в 1 м ³	62	67	68	50	44	43	49
свободной влаги	250	190	228	228	223	284	213
связанной влаги	156	168	171	124,5	109,5	108	123
Сколько воды необходимо удалить	343	291	331	303	288	349	287
в т.ч. в % свободной воды	73	65	69	75	77	81	74
в т.ч. в % связанной воды	27	35	31	25	23	19	26
Затраты энергии на 1 м³							
На разогрев абсолютно сухой древесины от 20°C до 100°C	806	868	884	643	566	558	636
На разогрев воды от 20°C до 100°C	1695	1498	1668	1474	1388	1640	1405
На испарение воды до W=12%	775632	658112	747156	684667	651671	789192	648620
Итого: кДж/м ³	778133	660478	749707	686785	653625	791390	650661
кВт/м ³	216	183	208	191	182	220	181
в т.ч. на испарен. свободной воды	157	120	143	143	140	179	134
в % от общих затрат	72	65	69	75	77	81	74
Расход сетевой энергии с учетом КПД СВЧ генератора 0,6 кВт	360,2	305,8	347,1	318,0	302,6	366,4	301,2
Затраты энергии при удалении до 50% свободной влаги в виде жидкости, кВт/м³	229,7	206,2	227,8	198,5	186,1	217,6	189,7
Экономия энергии, кВт/м³	130,6	99,6	119,3	119,4	116,5	148,8	111,5
%	36	33	34	38	38	41	37

35–60%. Учитывая эти факторы, при правильном проектировании СВЧ сушильных камер реальный расход электроэнергии составляет 280–350 кВт/м³. При скоростной СВЧ-сушке (0,2–0,5 ч) короткомерных пиломатериалов до 50% свободной влаги из древесины выдавливается избыточным давлением (определено опытным путем) и расход сетевой энергии составит 200–230 кВт/м³. Скоростной сушке могут подвергаться только те породы, которые имеют большую проницаемость вдоль волокон (береза, липа, бук).

Если вообще говорить о породах древесины, которые можно сушить в СВЧ-камерах, то в технической литературе встречается мнение, что СВЧ-способом нужно сушить только трудносохнущие породы древесины. Автор не согласен с таким мнением. СВЧ-способом можно и нужно сушить все породы древесины, которые требуют качественной сушки. Не рекомендуется применять СВЧ-камеры для промежуточной сушки, например для сушки древесины до транспортной влажности. Короткомерные заготовки таких пород, как береза, липа и бук лучше всего сушить конвейерным способом.

При сушке короткомерной древесины в СВЧ-конвейерах часть свободной влаги выдавливается в жидкой фазе, что позволяет сэкономить энергию на сушку на 30–35% (см. таблицу 1). СВЧ-способом лучше всего сушить заготовки с припуском на усушку и на обработку. Например, при производстве клееного бруса после дефектовки до 30% пиломатериала отправляется в отходы. На эти 30% пиломатериала уже затрачена энергия на сушку.

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СВЧ-СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Продолжительность СВЧ-сушки древесины зависит от пропускной способности древесины, т.е. от проницаемости древесины вдоль и поперек волокон, от количества СВЧ-энергии, поглощенной древесиной, а также длины пиломатериалов. При СВЧ-сушке перенос влаги, в основном, происходит за счет фильтрации (свободной воды или пара) через поры и капилляры древесины. Двигателем этого процесса является избыточное давление внутри древесины, образующееся при кипении свободной или связанной влаги. Согласно закону Дарси, чем выше избыточное давление внутри древесины, тем больше скорость фильтрации влаги внутри древесины.

Однако при определенных скоростях фильтрации режим ламинарного движения влаги переходит в квазиламинарный, отличающийся от турбулентного микрофлуктуациями температуры пара, что приводит к понижению вязкости и резкому росту давления. Для древесины сосны предельная скорость фильтрации ламинарного течения – 8 см/с. Исходя из этого скорость сушки ограничивается избыточным давлением, скоростью фильтрации и проницаемостью древесины.

Проницаемость древесины вдоль волокон в несколько тысяч раз больше, чем поперек волокон. Поэтому при СВЧ-сушке древесины, в основном, влага выходит через торцы. К примеру, проницаемость заболони березы поперек волокон меньше проницаемости вдоль волокон в 16 000 раз. В зависимости от породы древесины трещины внутри пропаренной древесины образуются при давлениях 3–6 атм.

Теоретические расчеты и практические опыты показали, что при избыточном давлении внутри древесины 1 атм. ($t=120^{\circ}\text{C}$) продолжительность сушки шестиметровых пиломатериалов любой толщины в зависимости от породы составила: березы – 6 часов; сосны – 18 часов; дуба – 3 суток (72 часа).

Чем короче пиломатериалы, тем меньше продолжительность сушки. Для примера, березовые заготовки длиной 0,5 м были качественно высушены за 15 минут. При этом до 50% свободной влаги выделялось в жидкой фазе.

СТОИМОСТЬ СУШИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЗАТРАТЫ НА СУШКУ

Мы попытались учесть недочеты имеющихся конструкций СВЧ-камер и произвели предварительные расчеты стоимости сушильных камер объемом 6 м³, оснащенных магнетроном мощностью 75 кВт. В соответствии с нашими данными себестоимость СВЧ-сушилок при серийном производстве составит 40–45 тыс. долларов. Продолжительность сушки сосновых пиломатериалов в таких камерах – 18 ч. Годовая производительность камеры составит 2000 м³, что соответствует производительности конвективной сушилки с объемом разовой загрузки 42 м².

Конвективные сушилки, которые обеспечают качественную сушку при объеме разовой загрузки 42 м³, на рынке деревообрабатывающего оборудования стоят 35–50 тыс. дол-

ларов. Кроме того, к этим сушилкам необходимо иметь котельную, коммуникационные системы, оборудование для подготовки, транспортирования и хранения топлива (щепы) и, соответственно, обслуживающий персонал для всего этого оборудования.

Затраты на СВЧ-сушку лимитированы энергетическими затратами, зарплатой оператора и затратами по амортизации магнетрона. Стоимость магнетрона с мощностью 75 кВт составляет 78 тыс. руб. При средней продолжительности эксплуатации магнетрона 15000 часов амортизационные затраты на 1 м³ высушенной древесины составят 15 рублей.

Стоит отдельно остановиться и на вопросе монтажа оборудования. Если для монтажа конвективных сушильных камер с котельным оборудованием требуется от 6 месяцев до 1 года, то СВЧ-установки имеют 100%-ную заводскую готовность. СВЧ-камера монтируется на платформе размерами 3x10 м, и для ее установки не требуется фундамент. СВЧ-сушка работает в автономном режиме, и для ее эксплуатации требуется только сетевая трехфазная электроэнергия с напряжением 380 В.

Важен и фактор теплопотерь. При конвективном процессе сушильный агент проходит не только между древесиной, но и между древесиной и камерой. По этой причине на нагрев оборудования и ограждений расходуется до 13% общих затрат тепла. На нагрев свежего воздуха тратится до 30% тепла.

По данным исследований, тепловой коэффициент полезного действия конвективных сушильных камер находится в пределах 0,4–0,5, т.е. полезно расходуется около половины общего потребления тепловой энергии. СВЧ-сушилки в этом отношении имеют огромное преимущество, т.к. тепло выделяется прямо внутри древесины. По этой причине нет необходимости делать камеры из теплоизоляционных материалов.

Таким образом, вышеперечисленные преимущества СВЧ-сушки древесины говорят о перспективности этого вида камер. В пользу СВЧ-камер свидетельствует и то, что постоянно ведутся разработки новых технологий сушки с применением токов СВЧ. Так, в последнее время разработаны технологии СВЧ-сушки пиломатериалов в камерах периодического действия, в конвейерных установках. Кроме того, разработана и уникальная технология СВЧ-сушки оцилиндрованного бревна. Поэтому есть основания считать, что со временем СВЧ-сушилки древесины будут такими же популярными, как обычные бытовые микроволновые печи. ■