

НЕТРАДИЦИОННАЯ СУШКА ДРЕВЕСИНЫ:

ВАКУУМНАЯ И СВЧ

Не должно принимать в природе иных причин, сверх тех, которые необходимы и достаточны для объяснения явлений. Ибо природа проста и не роскошествует излишними причинами.

И. Ньютон.

Сушка – процесс удаления влаги из материала путем ее испарения. В настоящее время основным промышленным способом сушки древесины является конвективная сушка. При конвективной сушке древесины испарение влаги происходит при температуре ниже точки кипения. Мы в данной статье рассмотрим и сравним два вида нетрадиционных способов сушки древесины – вакуумную и СВЧ. Эти два способа сушки древесины объединяет то, что испарение влаги из древесины происходит при температуре выше точки кипения. Процесс испарения можно объяснить в рамках кинетической теории. Молекулы воды движутся с различными скоростями. Между этими молекулами имеются значительные силы притяжения, которые и удерживают их вместе в жидком состоянии. Благодаря своим скоростям молекулы, находящиеся в верхних слоях жидкости, на некоторое время могут покинуть жидкость.

Но точно так же, как брошенный в воздух камень возвращается на землю, силы притяжения других молекул могут вернуть «сбежавшую» молекулу назад на поверхность жидкости (при условии, разумеется, что ее скорость не слишком велика). Если молекула имеет достаточно высокую скорость, то она окончательно оторвется от жидкости и станет частью газовой фазы. Только те молекулы, кинетическая энергия которых больше некоторого определенного значения, могут перейти в газообразное состояние. Согласно кинетической теории, число молекул с кинетической энергией, большей некоторого конкретного значения, увеличивается при повышении температуры. Это согласуется с хорошо известным наблюдением: при более высоких температурах скорость испарения больше. Поскольку самые быстрые молекулы улетают с поверхности жидкости, средняя скорость оставшихся

молекул уменьшается. А если средняя скорость уменьшается, то и абсолютная температура понижается. Таким образом, испарение представляет собой процесс охлаждения. Воздух обычно содержит водяные пары, причем они попадают в воздух главным образом за счет испарения. Для того чтобы изучить этот процесс несколько более детально, рассмотрим закрытый сосуд, частично заполненный водой, из которого удален воздух. Наиболее быстрые молекулы испаряются в пространство над жидкостью. Поскольку они движутся вблизи поверхности жидкости, некоторые из них будут сталкиваться с ней и возвращаться в жидкое состояние; этот процесс называется конденсацией. Число молекул пара возрастает до тех пор, пока не будут достигнуты такие условия, когда число возвращающихся в жидкость молекул равно числу молекул, покидающих жидкость за тот же промежуток времени. При этом мы имеем состояние равновесия, и про пространство над жидкостью говорят, что оно насыщено. Давление насыщенного пара не зависит от объема сосуда. Если бы мы уменьшили объем пространства над жидкостью,

то плотность молекул в газообразном состоянии возрастала бы. При этом за единицу времени с поверхностью воды сталкивалось бы больше молекул. Образовался бы результирующий поток молекул, возвращающихся обратно в жидкую фазу, и этот поток существовал бы до тех пор, пока не было бы вновь достигнуто равновесие, которое возникнет при том же давлении насыщенного пара. Давление насыщенного пара любого вещества зависит от температуры. При более высоких температурах больше молекул имеют кинетическую энергию, достаточную для перехода с поверхности жидкости в газообразное состояние. Следовательно, состояние равновесия будет достигнуто при более высоком давлении.

При обычной сушке испарение воды происходит не в вакуум, а в воздух над ней. Это существенно не изменит приведенных выше рассуждений. Состояние равновесия по-прежнему будет достигаться в момент, когда достаточное число молекул окажется в газообразном состоянии и число возвращающихся в жидкость молекул станет равно числу молекул, покидающих ее. Это число не зависит от присутствия воздуха, хотя столкновения с его молекулами могут удлинить время, необходимое для достижения состояния равновесия. Таким образом, равновесие будет при том же значении давления насыщенного пара, что и в отсутствие воздуха. Давление насыщенного пара жидкости растет с повышением температуры. Когда температура достигает той точки, в которой давление насыщенного пара становится равно внешнему давлению, начинается процесс кипения.

ВАКУУМНАЯ СУШКА

Основы вакуумной сушки.

На границе раздела двух фаз жидкость-пар имеет место равновесное протекание процессов испарения и конденсации. Испарение представляет собой процесс превращения жидкости в пар со скоростью, превышающей скорость обратного явления – конденсации. В обоих случаях происходит теплообмен, связанный с поглощением или выделением теплоты фазового перехода при изменении агрегатного состояния вещества: при испарении тепло поглощается, а при конденсации

высвобождается. Конденсация происходит при соприкосновении насыщенного пара с поверхностью, температура которой ниже температуры насыщения. Если температура поверхности превышает температуру насыщения, то никакой конденсации не происходит. Различают два вида конденсации: пленочную и капельную. В пленочной конденсации жидкий конденсат смачивает поверхность и образует на ней непрерывную пленку, которая оказывает значительное сопротивление тепловому потоку. В случае капельной конденсации пары конденсируются на охлаждаемой поверхности в центрах конденсации в виде капель. Они не смачивают полностью всю поверхность и растут только за счет конденсации в них пара и слияния их с другими, рядом расположенными каплями. Они увеличиваются до тех пор, пока под действием гравитационных или других сил не оторвутся от поверхности и не стечут по ней. Сухие и мокрые участки на поверхности чередуются, и она приобретает пятнистый вид. При капельной конденсации самая высокая интенсивность теплоотдачи. Для инициирования формирования капелек поверхность охлаждения обрабатывают тонким слоем вещества, которое имеет чрезвычайно низкую смачиваемость жидкостью. Таким образом, при вакуумной сушке происходит 2 фазовых перехода жидкость-пар и пар-жидкость.

Процессы сушки древесины в вакууме.

Процесс сушки состоит из перемещения пара и влаги к поверхности древесины и испарения в окружающую среду. Образовавшийся пар путем диффузии переходит в окружающую среду. В вакууме по мере уменьшения давления среды в поверхностном слое слабеют межмолекулярные связи, и те молекулы, у которых силы взаимодействия меньше других, отрываются и диффундируют в среду. При вязкостном режиме в камере они испытывают много столкновений на пути к стенке камеры. Поэтому часть их возвращается обратно, способствуя созданию пограничного слоя, часть остается в пространстве, объединяясь в ассоциации, а часть конденсируется, достигая стенки камеры и отдавая ей тепло конденсации. Температура стенки повышается, часть адсорбированных на ней молекул снова

отражается, поэтому стенку **необходимо интенсивно охлаждать**. Чем ниже температура охлаждения, тем больше конденсация водяного пара. Для интенсивного испарения необходимо, чтобы относительная влажность среды не увеличивалась, а поддерживалась в соответствии с режимом.

Интенсивное испарение влаги с поверхности древесины вызывает быстрое снижение ее влажности до предела гигроскопичности. После этого влага начинает перемещаться к поверхности древесины. По ее толщине образуется две зоны: околосредная – диффузионная и внутренняя – капиллярная. По мере высушивания диффузионная зона углубляется.

В результате интенсивного испарения влаги поверхность древесины быстро охлаждается до температуры окружающей среды и образуется пограничный слой, поэтому сушка резко замедляется. Чтобы интенсифицировать процесс испарения при таких условиях, необходимо либо разрушить пограничный слой над поверхностью, либо максимально уменьшить его толщину. Таким образом, материал при вакуумной сушке **необходимо постоянно нагревать**. Способ конвективного нагрева в данном случае отпадает, так как при снижении давления окружающей среды теплопроводность ее снижается. Отсюда вытекает необходимость комбинирования вакуумной сушки с другим способом нагрева. Тепло может передаваться контактным, радиационным или диэлектрическим методами. Передача тепла материалу при вакуумно-диэлектрическом способе позволяет реализовать эту возможность в полной мере.

Что предлагает рынок? В последние годы на рынке сушилок древесины доминирует два вида вакуумных камер. Первый вид с циклическим нагревом и второй с контактным нагревом древесины. В циклических камерах сначала производится нагрев древесины, а потом вакуумирование. Весь этот процесс повторяется несколько раз до тех пор, пока древесина не высохнет. При этом способе сушки передача тепла материалу производится конвективным способом. Предположим, что нам необходимо высушить древесину с циклическим конвективным нагревом древесины

Таблица 1.

Давление, МПа	Температура насыщения водяного пара, °С	Удельный объем пара, м³/кг	Плотность пара, кг/м³	Удельная теплота парообразования, кДж/кг
0,1	100	1.694	0,590	2257,5
0,01	45,8	14.671	0,068	2392,1

до температуры 90°C и сушкой в вакууме при температуре 45°C. Затраты на нагрев сырой древесины на 45°C (от 45°C до 90°C) составят $28946 + 66352 = 95298$ кДж/м³ (см. таблицу 2). При скрытой теплоте испарения воды 2392,1 кДж/кг за первый цикл испаряется 95298: 2392,1 = 40 кг воды. В процессе сушки после каждого цикла теплоемкость сырой древесины снижается. В каждый последующий раз из древесины будет испаряться все меньше и меньше влаги. Как показывают эти расчеты, циклов должно быть не менее 10. Недостатком этого способа сушки является большая продолжительность сушки древесины (продолжительность сушки приближается к продолжительности сушки конвективным способом), большие энергетические затраты (от 450 кВт/м³ и выше). Высокие затраты связаны с многократным нагревом и охлаждением не только древесины, но и всей сушильной камеры.

В вакуумных камерах с контактным нагревом передача тепла материалу производится пластинами, которые укладываются в штабель пиломатериалов. Пластины чередуются с пиломатериалами. Пластины нагреваются горячей водой или электроэнергией. Электрические нагреватели применяются жесткие или гибкие. Гибкие нагреватели изготовлены из прочной прорезиненной синтетической ткани с протянутой внутри углеродной нитью, и иногда

их называют «электропалочками». Недостатками этого способа сушки являются сложность укладки штабеля, низкий коэффициент использования пространства камеры, закрытие пласти пиломатериалов нагревательными элементами. В 80-е годы прошлого века хорошие результаты были получены при комбинировании вакуумной и диэлектрической сушки. В качестве источника энергии использовались высокочастотные (ВЧ) генераторы, работающие на частотах 5,28 МГц, 13,56 МГц, 26 МГц, 30 МГц. Однако, из-за громоздкости ВЧ-оборудования, данные сушилки распространения не получили.

К сожалению, на рынке сушилок встречаются вакуумные камеры с фантастическими затратами на сушку пиломатериалов – от 50 кВт/м³ за сушку древесины от начальной влажности 60% до конечной влажности 10%. Такие низкие расходы производители объясняют образованием холодного тумана или выдавливанием почти всей влаги в жидкой фазе. Но физические процессы, происходящие при вакуумной сушке, никто не отменил. При КПД 0,6 расход энергии при сушке свежесрубленной древесины до влажности 10% составит 400 кВт/м³. Но с учетом, что древесина в сушилку попадает с влажностью 40–60%, расход энергии не может быть менее 250–300 кВт/м³. Поэтому на рынке есть такие вакуумные камеры, которые не сушат древе-

сину или время сушки больше чем при конвективной сушке. В процессе сушки из 1 м³ древесины испаряется около 200 кг воды. Из штабеля объемом 5 м³ необходимо удалить 1 т воды. При продолжительности сушки 24 часа ежеминутно из древесины удаляются 700 г воды. Среда в камере может вмещать только до 1,4 кг влаги в виде пара. (При давлении 0,01 МПа среда в вакууме может вместить только 68 г воды в одном кубометре (см. таблицу 1)). При этом среда полностью насыщается, дальнейшая сушка прекращается, поэтому водяной пар из окружающей среды необходимо конденсировать и удалить из камеры. Поэтому вакуумные камеры должны снабжаться системой охлаждения. Особенно важно, что скорость конденсации пара внутри камеры должна быть больше или равной скорости испарения влаги. Согласно фазовым переходам жидкость–пар–жидкость, сколько тепла тратится на испарение воды, столько же тепла должно отводиться системой охлаждения камеры от конденсации пара. Некоторые производители думают, что вся влага будет конденсироваться на поверхности внутренней стенки камеры, и систему охлаждения не делают. Это приводит к прекращению процесса сушки или к увеличению сроков сушки древесины в 2–3 раза.

СВЧ-СУШКА

Одним из перспективных направлений в интенсификации сушки древесины является использование энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ). 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. Этот градиент избыточного давления резко интенсифицирует процесс сушки, так как в этом случае перенос пара происходит как путем молекулярной диффузии, так и путем фильтрации через поры и капилляры древесины. Этот вид переноса при СВЧ-нагреве подавляет остальные виды переноса.

В последние годы повышенное внимание привлекает использование в технологических процессах токов СВЧ. Привлекательность применения СВЧ-энергии для сушки древесины заключается в следующем:

- будучи влажным материалом, древесина обладает очень высокой поглощаемостью энергии электромагнитного поля СВЧ;
- возможность со скоростью света подвести и выделить в единице объема древесины мощность,

Таблица 2

Наименование	Сушка при давлении, МПа	
	10 000	100 000
Свойства древесины		
Плотность базисная (сосна)	415	
Влажность свежесрубленной др. (сосна)	85	
Теплоёмкость абс. сухой др., кДж/кг°C	1,55	
Свойства воды		
Теплоемкость воды, кДж/кг°C	4,18	
Скрытая теплота испарения воды, кДж/кг	2392,1	2257,5
Объем воды в древесине, кг		
в 1 м ³ свежесрубленной др.	353	
при W=10% в 1 м ³	42	
свободной влаги	228	
связанной влаги	124,5	
Сколько воды необходимо удалить	311	
Затраты энергии на 1 м³, кДж/м³		
На разогрев абсолютно сухой древесины		
– от 0°C до 100°C	-	64325
– от 0°C до 45°C	28946	-
На разогрев воды		
– от 0°C до 100°C	-	147450
– от 0°C до 45°C	66352	-
На испарение воды до W=10%	744541,125	702646,875
Итого	кДж/м³	кВт/м³
	839840	914421
	233	254

недоступную ни одному из традиционных способов подвода энергии;

- возможность осуществить бесконтактный избирательный нагрев и получить требуемое распределение температур в древесине, в т.ч. в режиме саморегулирующегося нагрева;
- возможность мгновенного включения и выключения теплового воздействия, что обеспечивает режим тепловой безынерционности и высокую точность регулирования нагрева;
- практически 100% КПД преобразования СВЧ-энергии в тепловую, выделяемую в нагреваемом материале, низкие потери энергии в подводящих трактах и рабочих камерах;
- возможность использовать в сушке древесины заложенные природой механизмы транспортировки больших объемов жидкости вдоль волокон.

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

Более подробно о проблемах и перспективах СВЧ-сушки древесины Вы можете прочитать в первом номере журнала за 2004г.

Что предлагает рынок? Ничего. В настоящее время ни в России, ни за рубежом рынка СВЧ-сушилок нет. Иногда появляются предложения СВЧ-сушилок. Но через год или два исчезают и распространения не получают. Причиной тому создание неконкурентоспособных СВЧ-сушилок. Сушилки создаются без понимания процессов СВЧ-сушки древесины.

ВАКУУМ + СВЧ-СУШКА

Несомненно, идеальным вариантом является комбинирование вакуумной сушки с СВЧ-сушкой. Но стоит ли комбинировать вакуумную и СВЧ-сушку? Рассмотрим положительные и отрицательные стороны комбинирования вакуумной и СВЧ-сушки.

Все хорошо помнят, наверное со школьного курса физики, лабораторную работу, когда под вакуумом воду кипятили при комнатной температуре. Поэтому многие думают, что сушка под вакуумом – самый экономичный способ сушки, не требующий больших энергетических затрат. Так ли это, и насколько экономичнее вакуумная сушка? В таблице 2 дается расчет энергетических затрат на сушку одного кубометра пиломатериалов вакуумным и СВЧ-способом. Затраты приведены без учета КПД установок. Как показы-

вает расчет энергетические затраты на сушку отличаются всего на 9%. Но здесь не учтены энергетические затраты на создание вакуума (работа вакуумного насоса) и на конденсацию пара внутри камеры (работа охладителя и циркуляционного насоса). Кроме того, при глубине вакуума 0,01 МПа удельное давление на стену вакуумной камеры составляет 9 тонн на квадратный метр. Поэтому стена вакуумной камеры должна быть в десять раз толще, чем стена в СВЧ-камере. Это приводит к увеличению металлоемкости камеры.

Из вышесказанного следует:

- вакуумные сушильные камеры не такие же экономичные, как думают;
- комбинирование вакуумной сушки с диэлектрическим нагревом требует дополнительных затрат на сушилку и на сушку древесины;
- СВЧ-способом древесину можно также быстро сушить, как и при вакуумной сушке;
- при СВЧ-сушке происходит стерилизация древесины;
- СВЧ-камеры более компактны и имеют меньшую массу;
- и в заключение: вакуумно-диэлектрические камеры выгодно применять там, где по технологии требуется низкотемпературная сушка древесины. ■

19-22 октября

7-я международная выставка-конференция

ДЕРЕВООБРАБОТКА

1-я специализированная выставка

КЛЕИ И ГЕРМЕТИКИ

3-я международная выставка

URAL TOOLS

Выставочный комплекс на Громова, 145

Организатор:

EXPO УРАЛЭКСПОЦЕНТР
ЕвроАзиатский Выставочный Холдинг
тел.: 343/3493017, 27
<http://www.uralexpo.ur.ru>

При содействии
Управления лесного комплекса
Министерства промышленности
Свердловской области

Официальная поддержка
Правительства
Свердловской области

Екатеринбург

ВЫСТАВКА

научно-практическая конференция

Информационный спонсор:
URALFIRM.ru

Официальный интернет-провайдер:
Урал-Интернет
www.Ural-Internet.ru