С.А. Бондарь.

ВАКУУМНАЯ И ПРЕСС- ВАКУУМНАЯ СУШКА ДРЕВЕСИНЫ.

Уже достаточно долгое время в России обсуждается среди специалистов по деревообработке способ сушки пиломатериалов в вакууме. Интерес к проблеме возник после появления сначала сообщений об установках итальянского производства, а затем и самой продукции фирмы WDE Maspell на нашем рынке. Через некоторое время выпуск аналогичных сушильных камер освоили и ряд отечественных компаний- «Энергия-Ставрополь», «Wood-Lander», МВ-Импульс, Вояджер-Восток и др. Повышенное внимание к этим установкам объясняется тем, что их производители анонсируют сушку пиломатериала в небывало короткие сроки- 1-4 сут в зависимости от породы и толщины древесины и при этом высокое качество получаемой в результате доски или заготовки. Такие сроки сушки вызвали у многих, кто не имел возможности на практике проверить реальное качество продукции то недоверие, развеять которое не даёт крайне скудная информация от производителей о сути процесса вакуумной сушки. Попытаемся разобраться.

Сушка пиломатериалов в условиях пониженного давления (обычно $р\_{абс}$=0,15-0,4 бар абсолютного давления или $р\_{разр}$=0,85-0,6 бар разрежения , чему соответствует значение температуры насыщения $t\_{нас}=$54,0-75,9 °С соответственно) относится к т.н. «высокотемпературному» процессу сушки. Такой тип процесса имеет место в случае, когда температура древесины $t\_{др}$ превышает температуру насыщения $t\_{нас} $водяного пара при данном давлении. Протекание высокотемпературного процесса сушки отличается большей интенсивностью по отношению к низкотемпературному процессу, когда температура древесины меньше температуры насыщения ($t\_{нас}= t\_{кип}$ - температура кипения ). Высокотемпературный процесс сушки проходит в две стадии: первая – до полного удаления свободной влаги по всей толщине доски вплоть до центральной плоскости и вторая- сушка до заданной конечной влажности с удалением только связанной влаги. Скорость высокотемпературной бездефектной сушки по отношению к нормативным ГОСТовским режимам конвективной камерной сушки выше в 4-5 раз. Так, например для группы твёрдолиственных пород ( бук, клён, ясень, вяз и др.) нормативное время сушки для низкотемпературного конвективного режима при толщине доски 50 мм составляет 12-14 суток, время же сушки в вакуумных и пресс-вакуумных установках для этих же сортаментов -3-4 суток. Процесс высокотемпературной сушки описан в отечественной литературе как минимум с 1957 года и затем получил своё теоретическое описание. Приведём ниже некоторую информацию по древесиноведению и теории высокотемпературного процесса сушки из литературных источников.

«Вода может находиться в двух основных структурных элементах древесины: в полостях клеток и сосудов – свободная влага и в стенках клеточных оболочек- гигроскопическая, или связанная, влага. …При сушке влажной древесины в первую очередь в пределах клетки полностью удаляется свободная влага и лишь затем, ниже предела гигроскопичности ($ w\_{пг}$- одновременно являющегося пределом усушки), начинает испаряться из её оболочки связанная. При уменьшении содержания в древесине связанной влаги …древесина усыхает». ( Цитирование по [1]).



Рисунок выше и текст далее по [4].



Объяснить возможность сохранения безупречного качества сушки при столь значительной интенсивности высокотемпературного ( даже не обязательно с использованием вакуума ) процесса можно учитывая тот факт, что на первом- наиболее опасном с точки зрения появления дефектов сушки- этапе при достижении температуры насыщения $t\_{нас}, $являющейся функцией давления «$р\_{кам}$», при котором ведётся процесс сушки в камере, сначала на поверхности, а затем- по мере продвижения вглубь- и в толще пиломатериала происходит интенсивное испарение свободной воды древесины ( псевдокипение ). В течение всей первой стадии сушки происходит продвижение образовавшегося водяного пара наружу и одновременно заглубление зоны выпаривания вплоть до центральной плоскости. На этом (после удаления всей свободной влаги) первый этап сушки заканчивается, в древесине остаётся только связанная влага, удаление которой до некоторого предела $w\_{конеч}$ , является задачей второго этапа сушки.

В паровой среде при её температуре «t» и относительной влажности «φ» значение влажности древесины «w» стремится к равновесной влажности [2]:

 $w\_{р}$=$10,6^{\left(\frac{φ}{100}\right)}\*(3,27-0,015t)$= $10,6^{φ¯}$(3,27- 0,015t),%, здесь:

 t= ($t\_{нас}$+∆t),ᵒС;

Δt= (t- $t\_{нас}$)- перегрев относительно $t\_{нас}$ ,ᵒС;

 φ=100%\*ρ/$ρ\_{нас}$, %;

 ϕ¯= ρ/$ρ\_{нас}$, отн.ед.

Значения для температуры насыщения - $t\_{нас}$ , удельного объёма и плотности водяного пара на линии насыщения - v’’, $ρ\_{нас}$ = 1/v’’ принимаются при данном « $р\_{кам}$», значения этих параметров для перегретого пара - v, ρ =1/v – принимаются при «$р\_{кам}$» и «t»- в соответствии с данными Таблиц физических свойств воды и водяного пара [5].

С погрешностью не более 0,5% можно в интервале температур $t\_{нас}$ от 50°С до 100°С для температур перегрева ∆t до 30°С, характерных в практике вакуумной сушки, можно принять:

φ = (273 +$t\_{нас}$)/(273 +$t\_{нас}$+∆t) = $Т\_{нас}$ /($Т\_{нас}+∆t)$.

При $t\_{нас}$ = 54°С и ∆t = 36°C вычислим: φ( 54; 36)= (273+54)/(273+54+36)=0,901; $w\_{р}$= 10,6^0.901(3.27-0.015\*54)= 20,641%.

При $t\_{нас}$ = 54°С и ∆t = 36°C по Таблицам[6]: v’’= 10,02 м³/кг, v= 11,15 м³/кг, φ( 100; 30)= v’’/v = 10,02/11,15=0,8987, $w\_{р}$= 10,6^0.8987(3.27-0.015\*54)=20,53%.

При $t\_{нас}$ = 100°С и ∆t = 30°C вычислим φ( 100; 30)= 0,926; $w\_{р}$= 10,6^0.926(3.27-0.015\*130)=11,75%.

При $t\_{нас}$ = 100°С и ∆t = 30°C по Таблицам[6]: v’’= 1.694 м³/кг, v= 1,841 м³/кг, φ( 100; 30)= v’’/v = 1,694/1,841=0,92015, $w\_{р}$= 10,6^0.92015(3.27-0.015\*130)=11,59%.

При кипении имеет место значение относительной влажности пара $φ\_{пар}$=100% (для насыщенного пара) и этому соответствует значение равновесной влажности древесины, равное пределу гигроскопичности $w\_{р}$=$w\_{пг} $($w\_{пг}=$26.1% при t=$t\_{нас}$=54°С и $w\_{пг}$=22,6% при t=$t\_{нас}$=75,9°С). Влажность « $w\_{пг}$» является функцией только температуры:

$w\_{пг}$= 10,6(3,27 – 0,015t) или:

$w\_{пг}$ =(34,66-0,159\*$t\_{нас}$),% .

При $t\_{нас}$ = 54°С вычислим $w\_{пг}$= 26,08%.

При $t\_{нас}$ = 100°С вычислим $w\_{пг}$= 18,76%.

Значение « $w\_{пг}$» характеризуется тем, что является границей, ниже которой свободной влаги нет ни в полостях клеток, ни в межклеточном пространстве древесины. При w < $w\_{пг}$ начинается усушка древесного волокна. Таким образом, при $w\_{р}$=$w\_{пг}$ , в зоне испарения свободная вода интенсивно удаляется при отсутствии усушки, а следовательно и при минимальных напряжениях в наружных слоях древесины. По мере продвижения зоны парообразования в толщу пиломатериала температура наружных слоёв $t\_{нар}$ = ( $t\_{нас} $+ ∆t) повышается на «∆t» относительно температуры насыщения, их равновесная влажность :

$w\_{нар}$ = $10,6^{[\left(\frac{φ}{100}\right)-1]}$\*$w\_{пг}$ = $(w\_{пг}$ -∆w)

снижается на «∆w» относительно предела гигроскопичности « $w\_{пг}$»:

∆w= $w\_{пг}$ \*[1- $10.6^{(φ-100)/100}$]

При φ( 54; 36)= 0,901 вычислим ∆w(54;36)= 0,208\*$w\_{пг}$= 5,436%

По Таблицам: ∆w\_табл(54;36)=26,08-20,53= 5,546%

При φ( 100; 30)= 0,926 вычислим ∆w(100;30)= 0,160\*$w\_{пг}$= 3,000%

По Таблицам: ∆w\_табл(100;30)=18,76-15,54= 3,221%

При значении ∆w наружные слои получают деформации растяжения ε=У, подвергаясь стеснённой усушке :

У=α\*∆w

и испытывая при этом напряжения растяжения:

σ=Е\*ε

( здесь ε- относительное растяжение поверхностных слоёв, У=($Ш\_{пг}$-$Ш\_{w})$/$Ш\_{пг}$- относительная свободная усушка поверхностных слоёв, $Ш\_{пг}$- ширина доски при её влажности w≥$w\_{пг}$, $Ш\_{w}$- ширина при влажности для случая свободной усушки,α- коэффициент усушки, Е- длительный модуль упругости древесины при заданных w и t ).

Регулированием подводимой тепловой мощности можно поддерживать допустимое значение ∆t ( соответственно ∆w и ε) и тем самым, ограничивая нарастание напряжений σ, добиться бездефектной сушки, чему способствует и постоянное «пропаривание» наружных слоёв древесины паром, движущимся от внутренних слоёв наружу.

Сравним ∆w\_табл(54;36)= 5,546% со значением ∆w, имеющим место на первой ступени при w>30% низкотемпературного режима при конвективной сушке, например бука 50 мм – t= 57°С, φ= 85%- в соответствии с Руководящими материалами по камерной сушке древесины [6].

∆$w\_{1б}$=(34,66- 0,159\*57)\*[1- 10,6^(-0.15)]= 7.633%> ∆w\_табл(54;36)= 5,546%

$σ\_{1б}$/$σ\_{54;36}$= $w\_{1б}/$∆w\_табл(54;36)= 7.633/5,546=1,376

Т.е при вакуумной сушке её скорость в 4 раза выше, а возникающие в древесине напряжения в 1,38 раза меньше!

 На втором этапе сушки- при удалении связанной влаги- опасности возникновения дефектов практически нет. Этот этап можно сравнить с третьей ступенью сушки при w<20% для нормального режима низкотемпературного процесса по [6].

Для обеспечения эффективной работы установок, не использующих конвекцию для реализации высокотемпературного процесса, – атмосферных, вакуумных и пресс-вакуумных (безотносительно конструктивных отличий и особенностей исполнения оборудования конкретным производителем), следует учитывать три обязательных условия.

Первое условие заключается в том, что пиломатериал загружается в камеру послойно с плоскими нагревателями – греющими пластинами, чем обеспечивается равномерная и интенсивная теплопередача. Второе условие –температура поверхности нагревателей превышает температуру насыщения ( кипения) при созданном в установке давлении( разрежении) – по определению.

Третье условие (не являющееся обязательным для атмосферных установок) заключается в том, что в полости камеры создается пониженное – относительно атмосферного – давление. Если верхняя крышка камеры выполнена в виде гибкой мембраны (обычно из силиконовой резины), то за счет разности значений давления создается прижимающее усилие между слоями пиломатериала и нагревателями, передаваемое послойно на металлическую конструкцию днища камеры. Это прижимающее усилие обеспечивает идеально плоскую форму досок и плотное прилегание поверхности пиломатериалов к нагревателям, что очень важно в случае, если теплопередача межу ними осуществляется кондуктивным путем. В этом варианте необходима точная калибровка по толщине пиломатериала для исключения неплотности прилегания досок к нагревателям.

Для того, чтобы обеспечить равномерность теплопередачи от нагревателей к поверхности досок без их калибровки, разумно организовать нагрев тепловым излучением через специально созданный (за счёт специальных выступов греющих пластин- используется в установках «Энергия-Ставрополь» и «Wood-Lander») небольшой зазор между плоскостью нагревателей и пиломатериалом. Теплопередача излучением в плоском зазоре не зависит от его величины и, следовательно, от неизбежного разбега пиломатериала по толщине.

Как было сказано выше, для осуществления высокотемпературного процесса сушки вакуумирование не является необходимым условием, однако в пресс-вакуумных сушильных установках используются дополнительные плюсы, которые предоставляет понижение давления внутри камеры. Во первых- снижение температуры процесса уменьшает тепловые потери и минимизирует обусловленное ею изменение цвета древесины. Во вторых- эффект мембранного пресса сказывается на идеальном фиксировании плоскости высушиваемых досок и заготовок. В третьих- плотный прижим слоёв нагревателей и слоёв пиломатериала обеспечивает идеальную равномерность процесса сушки.

Для сушки толстых сортиментов трудносохнущих пород ( дуб ) применяются специальные режимы на стадиях влажности древесины выше и ниже предела гигроскопичности. Применение этих режимов обеспечивает бездефектную сушку 50 мм дубового сортимента в течение 6-8 суток.

Процесс пресс-вакуумной сушки древесины реализуется в установках с разовой загрузкой от 0,5 до 10 м3, обеспечивая в доске толщиной 50 мм твердолиственных пород ( при продолжительности процесса сушки 4 суток ) – семь с половиной, а в случае хвойных пород (при продолжительности процесса сушки 2 суток ) - пятнадцать оборотов камеры ( циклов сушки ) в месяц, в доске толщиной 30 мм твердолиственных пород (при продолжительности процесса сушки 2 суток ) –15 оборотов, хвойных пород (при продолжительности процесса сушки 1 сутки -30 оборотов в месяц.

Испарившаяся из древесины вода в количестве примерно 250 литров на куб.м пиломатериала конденсируется на металлических стенках камеры и (при наличии )в теплообменнике-конденсаторе. Периодически конденсат сливается в канализацию.

В заключение в качестве примера приведём некоторые данные по особенностям конструктивного исполнения наиболее распространённых пресс-вакуумных камер сушки древесины.

В прессвакуумных камерах «Энергия-Ставрополь», «Wood-Lander» и WDE Maspell (Италия) применяются водяные плоские нагреватели, производители других фирм - МВ-Импульс, Вояджер-Восток и др. -применяют нагреватели с электрическими омическими греющими элементами. На установках WDE Maspell устанавливаются электрические водяные котлы, в камерах «Энергия-Ставрополь» и «Wood-Lander», их конструкция позволяет использовать как электрические, так и газовые (пропан/природный газ ) водонагревательные котлы в качестве источников нагрева. В силу того, что стоимость 1 МДж тепловой энергии составляет для электроэнергии, пропана и природного газа соответственно 1,5 руб/МДж, 0,75 руб/МДж и 0,1 руб/МДж, становится очевидной выгода от использования газа для сушки древесины. Понятно, что качество высушенного пиломатериала не зависит от применяемого энергоносителя, а определяется используемыми технологическими режимами сушки и корректной работой автоматики по реализации этих режимов.



Камера загрузкой 2 куб.м с газовым котлом «Энергия-Ставрополь».

 Камера с загрузкой 0,6 куб.м WDE Maspell .

Литература.

1. Кречетов И.В. Сушка древесины.1972.

2. Шубин Г.С. Физические основы и расчёт процессов сушки древесины.1973.

3. Микит Э.А., Упманис К.К. Интенсификация сушки пиломатериалов в камерах периодического действия. 1957.

4. Серговский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. 1975.

5. Александров А.А… Таблицы физических свойств воды и водяного пара. 1999.

6. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. 1985.