

РОЛЯТА НА ПОЛОЖИТЕЛНИЯ ТЕМПЕРАТУРЕН ГРАДИЕНТ ПРИ СУШЕНЕ НА ФАСОНИРАНИ ДЪРВЕСНИ МАТЕРИАЛИ

Теодор Лулчев¹, Христофор Виделов

Лесотехнически университет – София, e-mail: ¹teodorl72@abv.bg

РЕЗЮМЕ

В работата се разглеждат в теоретичен и технологичен план конкретни възможности за сушене в условията на положителен температурен градиент. Ускореното придвижване на водата от централните към повърхностните слоеве създава условия за по-бързо и по-качествено сушене. Разглеждат се четири случая когато е възможно създаването на подобни условия – високочестотно, микровълново и вакуумно сушене, както и чрез използване на циклични конвективни режими.

Ключови думи: сушене на дървесина, положителен температурен градиент, високочестотно сушене, микровълново сушене, вакуумно сушене, циклични конвективни режими

Сушенето на дървесината като енергоконсумиращ процес зависи от много фактори, определящи продължителността му и качеството на изсушените материали.

В преобладаващите методи на сушене енергията се влага под формата на топлина. Поради тази причина този процес носи наименованието топлофизично сушене. В най-общия случай топлофизичното сушене се състои от следните физични явления: топлообмен на повърхността дървесина-обработваща среда, топлопроводност – пренасяне на топлината в обема на тялото, водопроводност – пренасяне на водата в обема на тялото, и масообмен (изпарение) на водата от дървесната повърхност. При сушенето на дървесината лимитиращо (определящо) значение има водопроводността. Тя определя количеството на водата което се придвижва към повърхността на изсушаваните материали и се изпарява (отделя) в околната среда. Това количество е тясно свързано с общата продължителност на процеса, скоростта на изпарение и количеството на дефектите, които се поя-

вяват в изсушаваните материали. По литературни данни (Виделов 2003, Невенкин 1985, Серговски 1975, Чуудинов 1984, Siau 1971) водопроводността в най-общия случай се определя от уравнението (1):

$$dm = -D \left(\frac{dU}{dx} + \delta \frac{dT}{dx} \right) - k \frac{dP}{dx}, \quad (1)$$

където: dm е количеството на водата, преминало за единица време през единица площ, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

D – общият коефициент на дифузия (вагопроводност) на дървесината, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

δ - общият термоградиентен коефициент (термовлагопроводност) на дървесината, K^{-1} ;

k – коефициентът на молекулно пренасяне на паровъздушна смес в подложното на изсушаване тяло, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;

$\frac{dU}{dx}$, $\frac{dT}{dx}$, $\frac{dP}{dx}$ - градиенти на пренасянето съответно влажностен, температурен и градиент на налягането.

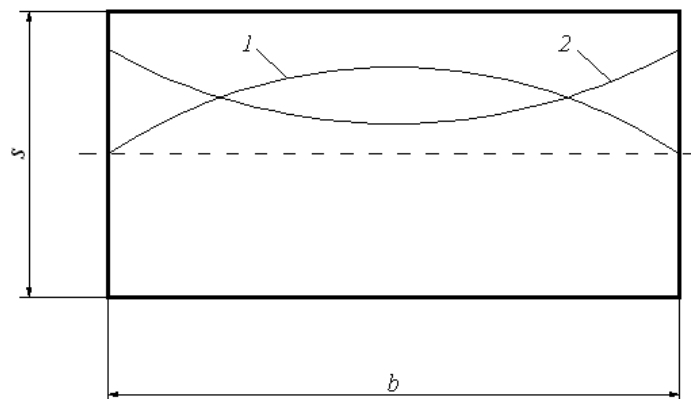
Съгласно формулата движението на водата в дървесината се осъществява под действието на една, две или три движещи сили – разлики във влажността, темпера-

турата и налягането (в обема на изсушаваното тяло). Посоката на движението е от точка с по-висока към точка с по-ниска стойност на движещата сила. Пренасянето на водата се осъществява както в течно така и в газообразно състояние с възможност за фазово превръщане. Съществена роля в скоростта на пренасянето, освен големината на движещите сили има и проводимостта на дървесината – дървесен вид, плътност, наличие на недостатъци и др.

При сушенето на масивна дървесина и особено на материали с по-голяма дебелина от съществено значение е посоката на водопренасянето – от центъра към повърхността или обратно. Определяща

роля за тази посока е разпределението на влажността, температурата и налягането в обема на тялото. Това разпределение освен от размерите на изсушаваните материали в най-голяма степен зависи от вида на топлообмена – контактен, конвективен или лъчист (радиационен), както и от режимите на сушене.

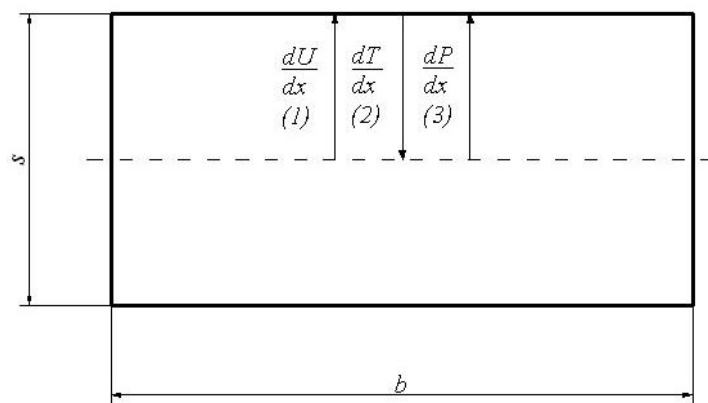
На фигура 1 са показани разпределения на влажността (крива 1) и температурата (крива 2) по напречното сечение на фасонирани материали при контактно и конвективно сушене. Тук влажността в централните слоеве ($W_{ц}$) е по-висока от тази в повърхностните ($W_{п}$), а температурата обратно – в централните ($t_{ц}$) е по-ниска от повърхностните ($t_{п}$).



Фиг. 1. Схематично разпределение на влажността (1) и температурата (2) по напречното сечение на фасонирани материали при контактно и конвективно сушене ($W_{ц} > W_{п}$, $t_{ц} < t_{п}$)

При класическите методи на сушене (контактно, конвективно, радиационно)

посоката на движение под действието на трите градиента е показана на фигура 2.



Фиг. 2. Посока на движение на водата под действието на влажностния (1), температурния (2) и градиента на налягането (3)

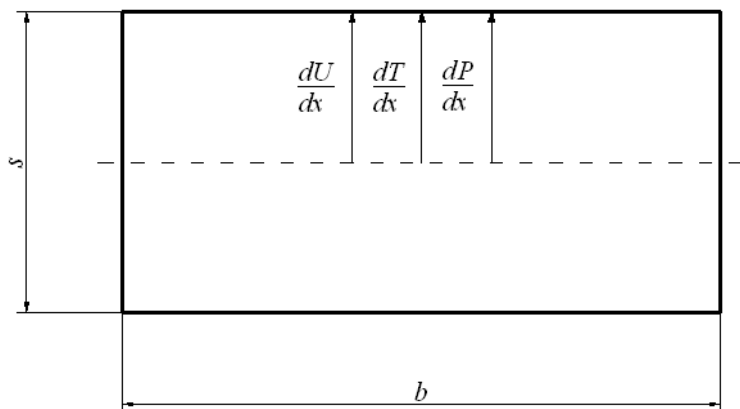
На фигури 1, 2 и 3:

s – дебелина на материала, mm

b – широчина на материала, mm

Както се вижда, при класическите методи на сушене движението на водата под действието на температурния градиент е от повърхността към центъра на материалите, т.е. в противоположна посока, предизвикана от действието на градиентите на влажността и налягането. Това явление е известно като сушене в условията на отрицателен температурен градиент. При тези условия придвижването на водата към повърхността е забавено,

което се отразява неблагоприятно на скоростта на изпарение и на общата продължителност на сушене. При техническото сушене е желателно осигуряване на условия на водопроводност при които действието на отрицателния температурен градиент е с най-малка продължителност и най-незначително (като количество придвижвана вода). Още по-добри резултати се получават когато движението на водата под действието на трите движещи сили е в една посока – от центъра на материалите към тяхната повърхност (фиг. 3).



Фиг. 3. Водопроводност в условията на положителен температурен градиент

Този процес е известен като сушене в условията на положителен температурен градиент. За да се създадат тези условия температурата на дървесината в централните ($t_{ц}$) слоеве трябва да бъде по-голяма от тази в повърхностните ($t_{п}$), т.е. $t_{ц} > t_{п}$.

Тези условия са трудно осъществими при контактното и конвективното сушене, където обмяната на топлината между топлоносителя (обработващата среда) и обработваното тяло (дървесината) се реализира на граничната повърхност.

При контактното сушене обмяната на топлина се извършва между нагreti плочи – дървесина, а при конвективното – газообразна или течна среда – дървесина. При радиационното сушене теплообмен-

ната зона може да се задълбочи в дървесината в зависимост от проникващата способност на лъчите енергоносители.

За да се осигурят условия при което температурата на централните слоеве е по-висока от тази на повърхностните е необходимо прилагането на по-специфични методи и режими на сушене. Като такива могат да се посочат:

- диелектрично или високочестотното сушене;
- микровълново сушене;
- вакуумно сушене;
- сушене чрез циклични (пулсиращи, осцилиращи) режими

При високочестотното сушене дървесината е поставена като диелектрик между пластините на кондензатор (ме-

тална мрежа, електроди) в един високо честотен контур. Високочестотния генератор осигурява честота на тока от 3×10^5 до 3×10^6 Hz. В резултат на диполната поляризация, подпомогната частично от структурната, електронната и йонната поляризация, водните молекули, намиращи се в дървесния субстрат, милиони пъти в секунда изменят ориентацията си в съответствие с поляритета на електричното поле. Триенето между водната молекула и дървесния субстрат генерира топлина, която осигурява разкъсване на връзката вода-дървесина, водопроводност и изпарение. Характерно за този процес е вътрешно генериране на топлина, при което централните слоеве на дървесината имат по-висока температура от тази на повърхността и са налице условия за сушене при положителен температурен градиент. В резултат на по-голямото количество вода, придвижена към повърхността, изпарението е ускорено, а общата продължителност на сушене се намалява многократно (3–4 пъти в сравнение с конвективното). Съществено предимство при този метод на сушене е равномерното и обемно загряване. Вложената електрическа енергия ориентировъчно се разпределя по следния начин: за загряване на дървесината – 10 %, за изпарение на влагата – 60 %, за създаване на положителен температурен градиент – 10 % и като топлинна загуба 20 %. Основен недостатък на този метод е високият специфичен разход на електроенергия – 2,5 до 4 kWh за изпаряване на 1 kg влага от дървесината. Този недостатък се избягва чрез комбиниране на конвективното с високочестотното сушене. При този метод електроенергията на високочестотното устройство се използва единствено за създаване на положителен температурен градиент в дървесината. Чрез друг топ-

лоносител, по конвективен път се осъществява нагряването, изпаряването на водата от дървесината и се компенсират топлинните загуби. По този начин специфичният разход на топлина се намалява до 1,0–1,5 kWh/kg изпарена влага.

В технологията на високочестотното сушене в режимите се въвежда факторът условен температурен градиент Y_d , определен по формулата (2):

$$Y_d = \frac{t_d - t_b}{0,5s}, \quad (2)$$

където: t_d е температура на дървесината в средата на материалите (70–100°C), °C;

t_b – температура на въздуха в съоръжението, °C;

s – дебелина на изсушавания материал, mm.

Условният температурен градиент в режимите за сушене варира от 1,5–3,0 °C/mm.

При микровълновото сушене дървесината се поставя като диелектрик в един високочестотен контур, където се облъчва с микровълни, получени от магнетрон. Формирането на топлината е като резултат на диполния характер на водната молекула и вътрешното триене което се получава при преориентацията на водните молекули, съдържащи се в дървесния субстрат (подобно при високочестотното сушене). Характерна особеност на микровълновото загряване е вътрешното генериране на топлина и пряката зависимост от мощността на лъчението и характеристиката на влажното тяло. В резултат на изпарението на водата от повърхността на дървесината в обема на материалите се създава неравномерно топлинно поле в което температурата на централните вътрешни слоеве е по-висока от тази на повърхността. Тази температурна разлика засилва движението на водата от центъра

към повърхността и заедно със съществуващата влажностна разлика осигурява по-голямо количество вода на повърхността. Сушилния цикъл обхваща следните явления: създаване на микровълни (в магнетрона) – облъчване на дървесината – поглъщане на вълни от дървесината – вътрешно обемно загряване на материала – фазово превръщане на част от водата в пара – водопроводимост към повърхността – повърхностно изпарение от изсушаваното влажно тяло. Този цикъл позволява по-интензивно отделяне на водата от дървесината и съкращаване на процеса на сушене десетки пъти в сравнение с конвективните методи на загряване. Стойността на положителния температурен градиент се регулира чрез режима на сушене и зависи от характеристиката на микровълните, характеристиката на дървесината и структурирането на отделните фази на режима. Основния недостатък на този метод на сушене се изразява, както и при високочестотното сушене, в значителния специфичен разход за отделяне на 1 kg влага – 2,5–3,5 kWh.

Друга възможност за създаване на положителен температурен градиент през определена част от времето за сушене е сушенето под вакуум. Вакуумното сушене се реализира в специализирани съоръжения (автоклави или камери) при които необходимата топлина се внася контактно или конвективно в среда от влажен въздух или прегрята пара. В определена част от времето или постоянно в съоръжението се поддържа понижено налягане (вакуум) в сравнение с атмосферното. Целта на вакуума е намаляване температурата на кипене на водата в дървесината, сушене при по-ниска температура на обработващата среда и ускорена водопроводност от центъра към повърхността на изсушавания материал. Уско-

ряването на водопроводността се реализира по два начина: чрез увеличаване коефициента на водопроводност на дървесината (a' , m/s) при понижено налягане и създаване на условия за възникване на положителен температурен градиент.

Положителният температурен градиент може да възникне при наличие на режими при цикличен вакуум и интензивно повърхностно изпарение. Режимът на сушене включва основно 2 фази – нагряване при атмосферно налягане и изпарение на водата под вакуум. През първата фаза се извършва конвективно нагряване на дървесината при нормално налягане. Целта на тази фаза е да загрее материала и да го доведе до подходящи термични условия за последващото сушене. През времето на конвективното нагряване температурата на повърхността на дървесината е с около 4–5 °C по-висока от тази в центъра. Обикновено тази фаза продължава около 1 h на всеки 10 mm от дебелината на изсушавания материал. През този период (условно наречен пасивна фаза) вентилаторите работят, а вакуумната помпа е спряна.

През втората фаза, чрез работа на вакуум помпата се намалява налягането в съоръжението, в резултат на което водата в загрялата дървесина се трансформира в пара при температура по-ниска от 100 °C. Колкото по-дълбок е създаденият вакуум, толкова по-малка е температурата на фазовото превръщане. Образованата водна пара се изпарява повърхностно и обемно. Изпарението на водата предизвиква охлаждане на повърхността, докато температурата в центъра на материалите е практически постоянна. По този начин се създават условия за възникване на положителен температурен градиент и устойчиво движение на водата от центъра към повърхността. Това движение е под дейс-

твие на два фактора – температурна и влажностна разлика, т.е. под действието на влажностен и положителен температурен градиент. Намалването на температурата на повърхността води до намаляване на вътрешното налягане на парите в клетките и устойчиво повърхностно изпарение. Намалването на налягането в съоръжението води до увеличаване на коефициента на термовлагопроводност и поддържане на достатъчно количество вода, достигнала до повърхността. Изпарението намалява или се прекратява когато парциалното налягане на парите на повърхността на дървесината се изравни с това на обработващата среда. На практика този момент се характеризира с появата на водни кондензни капки по повърхността на материала. С това се прекратява фазата на вакуумирането, което на практика продължава около 1 min на всеки 1 mm от дебелината на материала. Механизмът на вакуумирането засилва ролята на температурния градиент и обезпечава движението на водата от центъра към повърхността при малка влажностна разлика (малък влажностен градиент) по дебелина на материала, по-ниски влажностни напрежения, по-малко дефекти при устойчиво (достатъчно) повърхностно изпарение. От друга страна периодичното навлажняване на повърхността осигурява ефект на топлинно влажностно обработване и добро качество на сушене. По нататък следва нагриване при атмосферно налягане и повтаряне на цикъла. По този начин вакуумното сушене осигурява значително намаляване на продължителността на процеса и на енергийните разходи. Практиката показва, че посочените две предимства на вакуумното сушене са най-ясно изразени за материали с по-голяма (над 50 mm) дебелина, висока плътност и влажност под 30 %, т.е. при

отделянето на свързаната вода през втория период на сушене. Вакуумното сушене запазва своите предимства при обработваща среда не само влажен въздух но и прегрята пара, т.е. при сушене при по-високи температури от 100 °C.

Сушене в условията на положителен температурен градиент може да се реализира и чрез прилагането на циклични режими. Цикличните или още както се наричат осцилиращи или пулсиращи режими са приложими при конвективно сушене в газообразна среда. При тях всяка степен се реализира чрез цикли, като всеки цикъл се състои от две фази – активна и пасивна. През времето на активната фаза, наречена нагриваща, се осигурява внасяне на топлина, нагриване и топлообмен при включено отопление и вентилация. При пасивната фаза, наречена охлаждане, се спира активното внасяне на топлина с варианти на работещи или неработещи вентилатори. През времето на пасивната фаза в следствие на охлаждането и изпарението на водата от повърхността, температурата на повърхностните слоеве на дървесината се намалява, докато температурата на централните слоеве почти не се изменя. В резултат на тези условия се създава положителен температурен градиент, т.е. температурна разлика в обема на материала което ускорява движението на водата от центъра към повърхността. Това движение е под действието на влажностния и температурния градиент, а при високо температурно сушене (100 °C) и под действието на градиента на налягането. Устойчивото придвижване на водата от центъра към повърхността създава условия за интензивно повърхностно изпарение до изравняване парциалното налягане на водните пари над повърхността на дървесината и в обработващата среда. Ако се продължи ох-

лаждането се получава ефект на кондензация и появата на водни капки по повърхността, което от технологична гледна точка не е желателно. Основният въпрос при съставянето на тези режими е определяне общата продължителност на цикъла и на отделните фази, така че продължителността на времето при което съществува положителен температурен градиент е най-голямо. От изследвания е установено, че условия за действие на положителния температурен градиент съществуват в края на пасивната и началото на активната фаза. Конкретните стойности на отделните фази и общата продължителност на цикъла се определя от характеристиката на материала – размерна и топлофизична, както и от етапа на сушене, конструкцията на сушилната, скоростта на циркулация на въздуха и други. Познаването на разпределението

на температурните и влажностните полета в обема на изсушаваните материали позволява структурирането на цикличен режим с най-голяма продължителност на действие на положителен температурен градиент. Чрез моделиране на топло и влагопренасянето на дървесината (Виделов, Делийски, Лулчев. Част 2, 2010) може да се определят ориентировъчните стойности на температурните и влажностни градиенти, да се разработят нови или подобрят известни циклични режими. Пример за подобно разпределение на температурните полета в материали от смърч и бук с дебелина 40mm изсушавани по цикличен режим е даден в Таблица 1. В тъмните карета са отбелязани стойностите при които се наблюдава положителен температурен градиент.

Таблица 1. Изменение на температурата по дебелината ($d = 40 \text{ mm}$) на материали от дървесина на смърч и бук с влажност $W=20\%$ по време на сушене по цикличен режим

Време τ [min]	Температура t_c [°C]	Разстояние от повърхността на дървесината x [mm]				
		0	5	10	15	20
Материали от смърчова дървесина						
0	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
5	75,72	75,72	71,63	67,84	66,54	65,89
10	80,97	80,97	77,01	72,59	70,77	69,74
15	83,55	83,55	80,41	76,70	75,08	74,15
20	84,80	84,80	82,54	79,78	78,56	77,84
25	85,42	85,42	83,87	81,95	81,08	80,58
30	85,72	85,72	84,69	83,41	82,82	82,48
35	79,00	82,03	82,97	83,47	83,51	83,49
40	74,82	78,61	80,31	81,93	82,52	82,83
45	72,58	76,35	78,10	79,98	80,74	81,16
50	71,38	74,88	76,41	78,14	78,87	79,28
55	70,74	73,89	75,14	76,59	77,21	77,57
60	70,40	73,19	74,19	75,35	75,85	76,14
Материали от букова дървесина						
0	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
5	75,72	75,72	71,10	67,19	65,99	65,45
10	80,97	80,97	76,31	71,31	69,32	68,22
15	83,55	83,55	79,63	75,05	73,08	71,96
20	84,80	84,80	81,75	78,05	76,40	75,45

Време τ [min]	Температура t_c [°C]	Разстояние от повърхността на дървесината x [mm]				
		0	5	10	15	20
25	85,42	85,42	83,14	80,32	79,05	78,30
30	85,72	85,72	84,07	81,98	81,04	80,48
35	79,30	82,09	82,65	82,47	82,18	81,97
40	74,98	78,88	80,39	81,59	81,95	82,13
45	72,67	76,71	78,45	80,21	80,88	81,25
50	71,43	75,31	76,97	78,77	79,52	79,94
55	70,76	74,38	75,83	77,47	78,17	78,58
60	70,41	73,71	74,94	76,36	76,97	77,32

Осцилацията на параметрите на обработващата среда и на дървесината създава благоприятни условия за качествено сушене на масивна дървесина, намалена енергоемкост и приемлива продължителност.

Очертаните възможности за сушене на дървесина в условията на положителен температурен градиент трябва да се използват по-широко и с цел постигане на определени качествени и финансови резултати.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сушенето на масивна дървесина в условията на положителен температурен градиент позволява съкращаване на продължителността на процеса и осигурява добро качество на сушене.
2. Условия за възникване на положителен температурен градиент са възможни при случаите на височестотното, микровълновото и вакуумното сушене, както и при прилагането на циклични конвективни режими за фасонирани материали.
3. Конкретния избор на технологичното решение, при което е възможно създаване на положителен

температурен градиент зависи от характеристиката на суровината и на съоръжението, както и на поставените цели за качество и себестойност на крайния продукт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виделов, Х. (2003). Сушене и топлинно обработване на дървесината. ЛТУ, София.
2. Виделов, Х., Н. Делийски, Т. Лулчев, (2010). Теоретични основи на цикличните режими за конвективно сушене на дървесина. Част 1. Технология на цикличните режими за конвективно сушене, Дървообработване и производство на мебели, № 2, София.
3. Виделов, Х., Н. Делийски, Т. Лулчев, (2010). Теоретични основи на цикличните режими за конвективно сушене на дървесина. Част 2. Моделиране на топло- и влагопренасянето в дървесината по време на цикличните режими, Дървообработване и производство на мебели, № 2, София.
4. Невенкин, С. (1985). Сушене и сушилна техника, Техника, София.
5. Серговский, П.С. (1981). Гидротермическая обработка и консервация древесины, Лесная промышленность, Москва.
6. Чудинов, Б. (1984). Вода в древесине, Наука, Новосибирск.
7. Siau, J. (1971). Flow in wood. Syracuse University Press, New York.

THE ROLE OF POSITIVE TEMPERATURE GRADIENT IN WOOD DRYING

Teodor Lulchev¹, Christophor Videlov

University of Forestry – Sofia, e-mail:¹teodorl72@abv.bg

ABSTRACT

This study investigates the theoretical and technological aspects of concrete methods for wood drying in positive temperature gradient condition. Accelerated water movement from central wood layers to surface creates conditions for faster and better quality drying. It was explained four events when is possible benefit a similar condition: high-frequency drying, microwave drying, vacuum drying and by cyclic convective regimes.

Key words: regimes of drying, positive temperature gradient, high-frequency drying, microwave drying, vacuum drying, cyclic convective regimes