Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет лісового господарства,
деревооброблювальних технологій та
землевпорядкування**

**Кафедра деревооброблювальних технологій та
системотехніки лісового комплексу**

ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ ТА ЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти денної (заочної) форми навчання
спеціальності 187 Деревообробні та меблеві технології

Харків
2023

Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства,
деревооброблювальних технологій та землевпорядкування

Кафедра деревооброблювальних технологій та
системотехніки лісового комплексу

ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ ТА ЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти денної (заочної) форми навчання
спеціальності 187 Деревообробні та меблеві технології

Затверджено рішенням
навчально-методичної комісії
факультету ЛДЗ ДБТУ.
Протокол №__6_____
від ___06 березня 2023 р. _

Харків
2023

УДК 674.093(076)
Т38

Схвалено
на засіданні кафедри деревооброблювальних технологій та
системотехніки лісового комплексу.
Протокол №8 від 02 лютого 2023 р.

Рецензенти:
О. Б. Калюжний, канд. техн. наук, доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні імені О. І. Сідашенка Державного біотехнологічного університету.
Ю. О. Градиський, канд. техн. наук, доцент кафедри дерево-оброблювальних технологій та системотехніки лісового комплексу Державного біотехнологічного університету.

Т38 Технологія сушіння та захисту деревини. Методичні вказівки до виконання практичних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навчання спеціальності 187 Деревообробні та меблеві технології / Держ. біотехнол. ун-т; уклад.: С. А. Шевченко. – Харків, 2023. – 43 с.

Методичні вказівки призначені для набуття навичок проєктування технологічних процесів сушіння пиломатеріалів у сушильних камерах періодичної дії.

УДК 674.093(076)

Відповідальний за випуск: В. І. Д'яконов, к-т техн. наук, доцент

© Шевченко С. А., 2023
© ДБТУ, 2023

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень 3
Вступ 8
Практична робота №1. Дослідження взаємозв'язків між основними параметрами сушильних камер. Складання технічного опису сушильної камери 8
Практична робота №2. Програми сушіння пиломатеріалів 9
Практична робота №3. Визначення тривалості сушіння пиломатеріалів 12
Практична робота №4. Розрахунок продуктивності та необхідної кількості сушильних камер 18
Практична робота №5. Визначення параметрів агенту сушіння 23
Практична робота №6. Визначення витрат теплової енергії на процес сушіння 29
Практична робота №7. Визначення собівартості сушіння пиломатеріалів 37
Список використаних джерел 40

Перелік умовних позначень

A_B – коефіцієнт, який враховує початкову і кінцеву вологість пиломатеріалів;

$A_Д$ – коефіцієнт, який враховує відношення довжини пиломатеріалів до їх товщини;

A_K – коефіцієнт, який враховує категорію якості сушіння пиломатеріалів;

A_P – коефіцієнт, який враховує категорію режиму сушіння;

$A_Ц$ – коефіцієнт, який враховує інтенсивність циркуляції повітря в камері;

B – ширина штабеля, м;

C_A – витрати на амортизацію, грн;

$c_В$ – теплоємність води, $c_В$=4190 Дж/(кг·°С);

$C_С$ – середня питома теплоємність деревини для діапазону температур від середньорічної до кінцевої, Дж/(кг·°С);

$C_М$ – середня питома теплоємність деревини для мінусових температур, Дж/(кг·°С);

$C_П$ – середня питома теплоємність деревини для плюсових температур, Дж/(кг·°С);

c_τ – поправочний коефіцієнт, залежний від безрозмірної вологості та співвідношення товщини і ширини пиломатеріалу;

d_0 – вологовміст свіжого повітря, г/кг;

d_1 – вологовміст повітря на вході в штабель, г/кг;

d_2 – вологовміст повітря на виході зі штабеля, г/кг;

J_0 – тепломісткість свіжого повітря, $J_0=46\cdot10^3$ Дж/кг;

J_1 – тепломісткість повітря на вході в штабель, Дж/кг;

$F_Ж$ – живий перетин штабелів, м^2;

h – товщина пиломатеріалів, м;

H –висота штабеля, м;

i – порядковий номер пиломатеріалу;

i_{max} – кількість різновидів пиломатеріалів у виробничій програмі;

K_i – перевідний коефіцієнт і-го фактичного матеріалу в умовний;

$k_{вик}$ – коефіцієнт використання сушильної камери (0,92).

$k_{Зап}$ – коефіцієнт запасу повітря.

k_M – коефіцієнт, що враховує вартість транспортування, монтажу та пусконалагоджувальних робіт;

$K_{Об}$ – коефіцієнт об'ємного всихання;

$к_{Ог}$ – коефіцієнт теплопередачі даного огородження, Вт/(м^2·°С);

$k_{ТО}$ – коефіцієнт, що враховує вартість технічного обслуговування та ремонтних робіт;

L – довжина штабеля, м;

m_0 – маса свіжого повітря на 1 кг випаруваної вологи, кг;

m_1 – маса вологи, яка випаровується з 1 м^3 пиломатеріалів, завантажених у камеру, кг;

$M_{КО}$ – маса вологи, яка випаровується за один камерооборот, кг.

$m_Ц$ – маса циркулюючого повітря, яка потрібна для випаровування 1 кг вологи, кг/кг.

n – кількість штабелів у сушильній камері;

$n_{кам}$ – необхідна кількість сушильних камер;

$n_{КО}$ – кількість камерооборотів за рік;

$n_{Перп}$ – кількість штабелів у ряді, розміщеному перпендикулярно до повітряного потоку;

P_1 – парціальний тиск водяної пари в повітрі на вході в штабель, Па;

P_A – атмосферний тиск, Па.

P_H – тиск насичення при температурі, відповідній даній ступені сушіння, Па;

q_B – питомі витрати теплоти на випаровування вологи, Дж/кг;

$q_{НЗ}$ – питома витрата теплової енергії на нагрівання пиломатеріалів у зимових умовах, Дж/м^3;

$Q_{НЗ}$ – витрати енергії на нагрівання деревини в зимових умовах, Дж;

$q_{НС}$ – питома витрата теплоти на нагрівання пиломатеріалів у середньорічних умовах, Дж/м^3;

$Q_{НС}$ – витрати енергії на нагрівання деревини в середньорічних умовах, Дж;

S – товщина пиломатеріалів, мм;

$S_{Ог}$ – площа кожного окремого огородження, м^2;

$S_{Пр}$ – товщина прокладок, мм;

t_1 – температура повітря на вході в штабель, °С;

t_2 – температура повітря на виході зі штабеля, °С;

t_K – кінцева (максимальна) температура нагрівання деревини, °С;

t_C – середньорічна температура, °С;

$T_{Сл}$ – розрахунковий термін служби сушильної камери, років;

$t_П$ – температура деревини на початку нагрівання (розрахункова температура опалення), °С;

t_M – температура деревини, яку приймають за температуру змоченого термометра відповідно режиму, °С.

Q_B – витрати теплоти на випаровування вологи із пиломатеріалів, Дж.

P_B – потужність, необхідна для випаровування вологи, Вт.

$P_{Oг}$ – потужність теплових втрат через окреме огородження, Вт;

$P_{OгΣ}$ – сумарна потужність теплових втрат через всі огородження, Вт.

$Q_{Oг}$ – енергія, яка витрачається через огородження, Дж;

Q_C – сумарні витрати енергії на сушіння в середньорічних умовах, Дж;

$Q_З$ – сумарні витрати енергії на сушіння в зимових умовах, Дж.

$K_{Дод}$ – коефіцієнт, який враховує додаткові витрати теплоти;

P_K – теплова потужність калориферів;

ρ_B – густина води, кг/м^3;

c_B – теплоємність води, 4210 Дж/(кг·К);

$t_{Вх}$ – температура води на вході в сушильну камеру, 90-95°С;

$t_{Вих}$ – температура води на виході із сушильної камери, °С.

$t_З$ – температура середовища із зовнішньої сторони огородження, °С.

t_P – температура середовища в сушильній камері, відповідно до режиму, °С;

V_0 – потік свіжого повітря, м^3/с;

v_0 – приведений питомий об'єм свіжого повітря, м^3/кг (0,87 м^3/кг).

v_1 – приведений питомий об'єм повітря на вході в штабель, м^3/кг.

V_2 – потік відпрацьованого повітря, м^3/с;

v_2 – приведений питомий об'єм відпрацьованого повітря, м^3/кг.

V_B – максимальна витрата гарячої води, м^3/с;

$V_Д$ – об’єм деревини, який завантажують у камеру, м^3;

υ – швидкість циркуляції повітря через штабель м/с ;

$V_П$ – потік повітря, м^3/с;

υ_C – швидкість випаровування вологи при сушінні, кг/с.

υ_P – розрахункова швидкість випаровування вологи, кг/с;

w – коефіцієнт вологопровідності, м^2/с;

W_K – кінцева вологість пиломатеріалів;

$W_{НЗ}$ – вміст незамерзлої вологи в деревині, %;

$W_П$ – початкова вологість пиломатеріалів, %;

W_P – рівноважна вологість пиломатеріалів;

$W_{ТН}$ – вологість точки насичення деревного волокна;

α – коефіцієнт вологообміну, м/с;

$\alpha_{Вн}$ – коефіцієнт теплообміну внутрішньої сторони огородження Вт/(м^2·°С);

$\alpha_{Зовн}$ – коефіцієнт теплообміну зовнішньої сторони огородження, Вт/(м^2·°С);

δ_i – товщина і-го шару огородження, м;

$\beta_{Вис}$ – коефіцієнт заповнення штабеля по висоті;

$\beta_{Об}$ – повне об'ємне всихання деревини;

β_T – табличне (вихідне) значення коефіцієнта об'ємного заповнення штабеля;

$\beta_Ф$ – фактичний коефіцієнт об'ємного заповнення штабеля.

$\beta_У$ – фактичний коефіцієнт об'ємного заповнення штабеля умовним матеріалом;

ρ_1 – густина повітря на вході в штабель, кг/м^3;

λ_i – теплопровідність і-го шару огородження, Вт/(м·°С);

γ – питома теплота плавлення льоду, Дж/кг (335·10^3 Дж/кг);

$\rho_П$ – щільність деревини при початковій вологості, кг/м^3;

$\rho_У$ – умовна (базова) щільність деревини (табл. А.6), кг/ м^3;

ϑ – безрозмірна вологість;

$\tau_{Вих}$ – вихідна тривалість сушіння пиломатеріалів у камерах періодичної дії низькотемпературним режимом, годин;

$\tau_{КО}$ – тривалість камерообороту, діб;

$\tau_{КО\,у}$ – тривалість камерообороту при сушінні умовного матеріалу, діб;

$\tau_Д$ – тривалість допоміжних операцій, діб;

τ_C – тривалість сушіння, годин;

φ_1 – насиченість водяної пари на вході в штабель;

χ – коефіцієнт нерівномірності сушіння;

$Г$ – габаритний об’єм штабелів, м^3;

$П_Ф$ – продуктивність сушильної камери у фактичному матеріалі, м^3/рік;

$П_У$ – продуктивність сушильної камери для умовного матеріалу, м^3/рік;

$У$ – об’єм умовного матеріалу, м^3;

$У_{Об}$ – об'ємне всихання пиломатеріалів;

$Ф_i$ – об’єм і-го фактичного матеріалу, м^3;

$Ц_{СК}$ – вартість сушильної камери, грн.

Практична робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ’ЯЗКІВ МІЖ ОСНОВНИМИ ПАРАМЕТРАМИ СУШИЛЬНИХ КАМЕР. СКЛАДАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОПИСУ СУШИЛЬНОЇ КАМЕРИ

Мета: вибрати конвекційну сушильну камеру періодичної дії, для якої будуть виконуватись подальші розрахунки на наступних практичних заняттях, визначити типові значення і діапазони зміни основних параметрів сушильних камер.

Порядок виконання.

1. Виберіть фірму-виробника конвекційних сушильних камер самостійно або за вказівкою викладача.

2. Виберіть параметричний ряд конвекційних сушильних камер, для яких буде здійснюватись дослідження взаємозв’язків між їх основними параметрами.

3. Занесіть в таблицю 1.1 основні параметри сушильних камер, зокрема: споживану теплову потужність Рт, споживану електричну потужність Ре, габаритні розміри камери (довжина L, ширина В, висота Н), розміри штабелів (довжина Lш, ширина Вш, висота Нш),

Таблиця 1.1 – Основні параметри сушильних камер

Модель	Рт, кВт	Ре, кВт	Кількість штабелів	Розміри штабелів			Габаритні розміри камери		
				Lш, м	Вш, м	Нш, м	L, м	В, м	Н, м

4. Обчисліть сумарний об’єм штабелів
5. Побудуйте регресійні залежності:

– споживаної теплової потужності від сумарного об’єму штабелів;

– споживаної електричної потужності від сумарного об’єму штабелів;

– об’єму камери від сумарного об’єму штабелів;

– сумарної площі огороджень від сумарного об’єму штабелів.

6. Зробіть висновки щодо характерну досліджуваних залежностей;
7. Для однієї з моделей камери складіть технічний опис сушильної камери, у якому зазначте:

– модель та фірму-виробника;

– розташування камери (у цеху чи назовні);

– основні технічні параметри;

– структуру огородження камери;

– кількість та потужність вентиляторів;

– тип калориферів;

– використовуване датчики та виконавчі механізми системи керування;

– можливість керування камерою із використанням комп’ютерних і мережевих технологій;

– інші конструктивні особливості.

Контрольні питання

1. Якими параметрами характеризується сушильна камера?
2. Назвіть переваги та недоліки сушарок з надвисокочастотним нагрівом деревини та аеродинамічним нагрівом деревини.
3. Які рідини використовуються при сушінні деревини

Практична робота №2
ПРОГРАМИ СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

Мета: навчитись вибирати програми сушіння пиломатеріалів та здійснювати переведення параметрів, що характеризують стан агенту сушіння.

Порядок виконання.

1. За вказівкою викладача запишіть дані щодо обрізних пиломатеріалів, для яких визначатимуться програми сушіння, у табл. 2.1. У таблицю також запишіть нормативно-технічний документ, відповідно до якого здійснюється сушіння.

Таблиця 2.1 – Відомості про пиломатеріали

Порода	Перетин, мм	Об'єм, $м^3$	Початкова вологість, %	Кінцева вологість, %	Нормативно-технічний документ

2. Для кожного різновиду пиломатеріалів заповніть таблицю за формою, наведеною в табл. 2.2, де зазначте діапазони вологості деревини та відповідні значення параметрів, що характеризують стан агенту сушіння відповідно до заданого нормативно-технічного документа.

Табл. 2.2 Режим сушіння _____ пиломатеріалів
(порола деревини)
перетином _____ мм відповідно до режиму _____
(розміри) (позначення)
_____ у сушильній камері періодичної дії
(нормативно-технічний документ)

Поточна середня вологість деревини, %	Температура сухого термометра, °С	Різниця температур сухого та вологого термометрів, °С	Насиченість повітря, φ	Рівноважна вологість деревини, %

3. Параметри агенту сушіння, відсутні в нормативно-технічному документі, визначте за допомогою діаграми рівноважної вологості (рис. 2.1) таблиці для визначення стану агента сушіння (табл. 2.3).

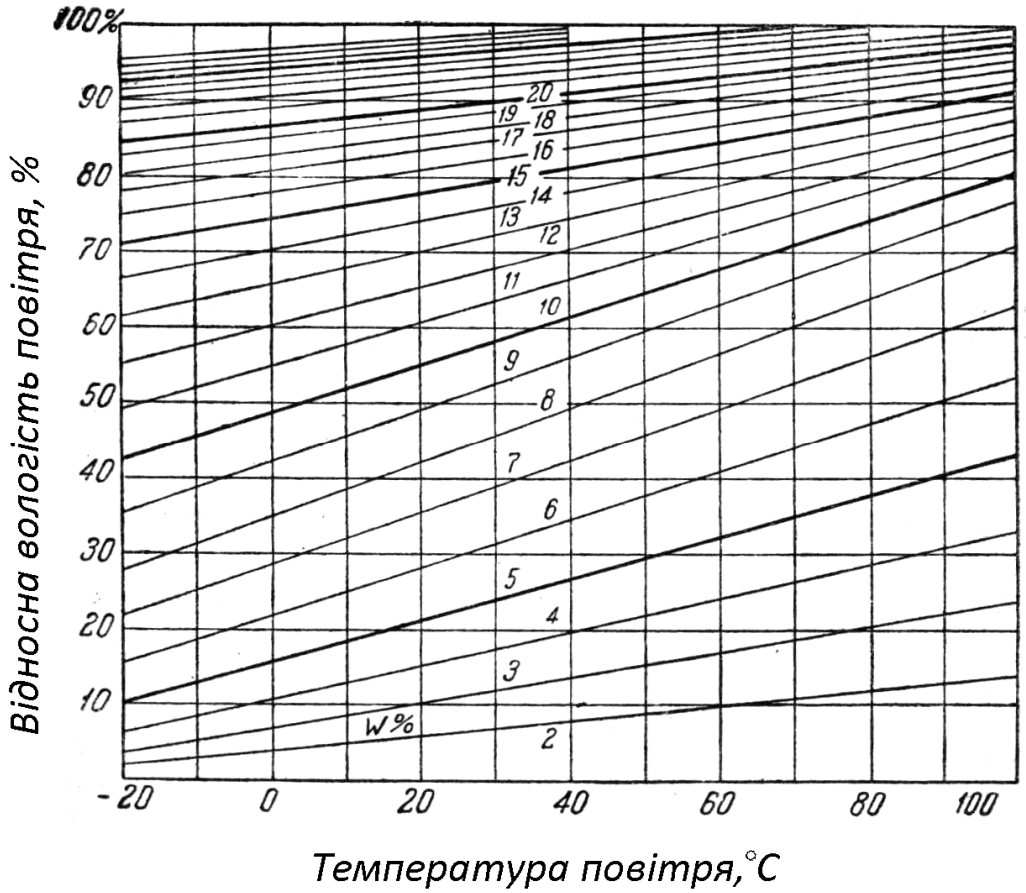


Рисунок 2.1 – Діаграма рівноважної вологості деревини

Контрольні питання

1. Якими параметрами характеризується стан агенту сушіння?
2. Які методи вимірювання вологості агента сушіння використовуються в сушарках?
3. Які методи вимірювання вологості деревини використовуються в процесі її сушіння?

Таблиця 2.3 – Таблиця для визначення ступеня насиченості агента сушіння (при швидкості 1,5-2,5 м/с)

Температура сушильного агента, t, °C	Психрометрическая разность, Δt, °C																																
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
30	100	93	87	79	73	66	60	55	50	44	39	34	30	25	20	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	100	94	87	80	73	67	62	57	52	46	41	36	32	28	23	19	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	100	94	87	81	74	68	63	58	54	48	43	38	34	30	26	22	19	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	100	94	88	81	75	69	64	59	55	50	45	40	36	32	28	25	21	18	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	100	94	88	82	76	70	65	60	56	51	46	42	38	34	30	27	24	20	17	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	100	94	88	82	76	71	66	61	57	53	48	44	40	36	32	29	26	23	20	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	100	94	89	83	77	72	67	62	58	54	49	46	42	38	34	31	28	25	22	19	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	100	94	89	83	78	73	68	63	59	55	50	47	43	40	36	33	30	27	24	21	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	100	94	89	84	79	74	69	64	60	56	51	48	44	41	38	34	31	28	25	22	20	16	-	-	-	-	-	-	-	-
48	100	95	90	84	79	74	70	65	61	57	52	49	46	42	39	36	33	30	27	24	22	17	-	-	-	-	-	-	-	-
50	100	95	90	84	79	75	70	66	62	58	54	50	47	44	41	37	34	31	29	26	24	19	14	-	-	-	-	-	-	-
52	100	95	90	84	80	75	71	67	63	59	55	51	48	45	42	38	36	33	30	27	25	20	16	-	-	-	-	-	-	-
54	100	95	90	84	80	76	72	68	64	60	56	52	49	46	43	39	37	34	32	29	27	22	18	14	-	-	-	-	-	-
56	100	95	90	85	81	76	72	68	64	60	57	53	50	47	44	41	38	35	33	30	28	23	19	15	-	-	-	-	-	-
58	100	95	90	85	81	77	73	69	65	61	58	54	51	48	45	42	39	36	34	31	29	25	20	17	-	-	-	-	-	-
60	100	95	90	86	81	77	73	69	65	61	58	55	52	49	46	43	40	37	35	32	30	26	22	18	14	-	-	-	-	-
62	100	95	91	86	82	78	74	70	66	62	59	56	53	50	47	44	41	38	36	33	31	27	23	19	16	-	-	-	-	-
64	100	95	91	86	82	78	74	70	67	63	60	57	54	51	48	45	42	39	37	34	32	28	24	20	17	-	-	-	-	-
66	100	95	91	86	82	78	75	71	67	63	60	57	54	51	49	46	43	40	38	35	33	29	25	22	18	15	-	-	-	-
68	100	95	91	87	82	78	75	71	68	64	61	58	55	52	49	46	44	41	39	36	34	30	26	23	19	16	-	-	-	-
70	100	96	91	87	83	79	76	72	68	64	61	58	55	52	50	47	44	41	39	37	35	31	27	24	20	17	-	-	-	-
72	100	96	91	87	83	79	76	72	69	65	62	59	56	53	50	47	45	42	40	38	36	32	28	25	21	18	-	-	-	-
74	100	96	92	87	84	80	76	72	69	65	63	60	56	53	51	48	46	43	41	39	37	33	29	26	22	19	14	-	-	-
76	100	96	92	87	84	80	77	73	70	66	64	61	57	54	52	49	47	44	42	40	38	34	30	27	23	20	15	-	-	-
78	100	96	92	88	84	80	77	73	70	66	64	61	58	55	53	50	48	45	42	40	38	34	31	27	24	21	16	-	-	-
80	100	96	92	88	84	80	77	73	70	66	64	61	58	55	53	50	48	45	43	41	39	35	31	28	25	22	17	-	-	-
82	100	96	92	88	84	80	77	74	71	67	65	62	59	56	54	51	49	46	44	42	40	36	32	29	26	23	18	-	-	-
84	100	96	92	88	84	80	77	74	71	68	65	62	59	56	54	51	49	46	44	42	40	36	32	29	26	23	19	14	-	-
86	100	96	92	88	84	80	78	75	72	69	66	63	60	57	55	52	50	47	45	43	41	37	33	30	27	24	20	15	-	-
88	100	96	92	89	85	81	78	75	72	69	66	63	60	57	55	52	50	48	46	44	42	38	34	31	28	25	21	16	-	-
90	100	97	93	89	85	81	79	75	72	69	66	63	61	58	56	53	51	49	47	45	43	39	35	32	29	26	22	18	-	-
92	100	97	93	90	86	82	79	76	73	70	67	64	62	59	57	54	52	50	47	45	43	39	36	33	30	26	22	19	16	-
94	100	97	93	90	86	82	79	76	73	70	67	65	62	60	57	54	52	50	48	46	44	40	37	33	30	27	23	20	17	-
96	100	97	93	90	87	83	80	76	73	70	68	65	62	60	58	55	53	51	48	46	44	41	37	34	31	28	24	21	18	-
98	100	97	93	90	87	83	80	77	74	71	68	65	63	60	58	55	53	51	49	47	45	41	38	34	31	28	25	22	19	16
100	100	97	93	90	87	83	80	77	74	71	68	66	63	61	59	56	54	52	49	47	45	42	38	35	32	29	26	23	20	17

Практична робота №3
ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

Мета: навчитись розраховувати тривалість сушіння пиломатеріалів табличним методом.

Короткі пояснення. При виконанні практичного завдання розрахунок тривалості сушіння здійснюється двома методами. Вибір методу розрахунку залежить від нормативно-технічного документу, відповідно до якого здійснюють сушіння. Для режиму відповідно до «Пиломатеріали хвойних і листяних порід. Режими сушіння в камерах періодичної дії» обчислення здійсніть відповідно до п. 1, а для інших нормативно-технічних документів – відповідно п. 2.

Порядок виконання.

1 Для режиму відповідно до «Пиломатеріали хвойних і листяних порід. Режими сушіння в камерах періодичної дії» використовують табличний метод визначення тривалості сушіння за наступною формулою:

$$\tau_C = \tau_{Вих} A_P A_Ц A_B A_K A_Д \quad , \qquad (3.1)$$

де τ_C – тривалість сушіння, годин;

$\tau_{Вих}$ – вихідна тривалість сушіння пиломатеріалів у камерах періодичної дії низькотемпературним режимом, годин (табл. 3.1);

A_P – коефіцієнт, який враховує категорію режиму сушіння (для нормального режиму – 1,0, а для м'якого – 1,7);

$A_Ц$ – коефіцієнт, який враховує інтенсивність циркуляції повітря в камері (табл. 3.2);

A_B – коефіцієнт, який враховує початкову й кінцеву вологість пиломатеріалів (табл.. 3.3);

A_K – коефіцієнт, який враховує категорію якості сушіння пиломатеріалів (для I категорії – 1,25; для II категорії – 1,15; для III категорії –1,05);

$A_Д$ – коефіцієнт, який враховує відношення довжини пиломатеріалів до їх товщини (табл. 3.4).

Таблиця 3.1 – Вихідна тривалість сушіння пиломатеріалів у камерах періодичної дії при низькотемпературному процесі, годин

Товщина пиломате-ріалів, мм	Ширина пиломатеріалів, мм					
	40-50	60-70	80-100	110-130	140-180	більше 180 і необрізні
Сосна, ялина, ялиця, кедр						
До 16	23	25	26	27	27	27
19	29	31	32	33	33	33
22	34	37	39	39	39	39
25	45	50	53	54	55	55
32	59	63	68	72	73	73
40	71	79	84	86	88	88
50		93	99	100	104	105
60		103	114	122	125	130
70			147	161	178	194
75			156	177	197	218
100			340	354	379	432
Модрина						
До 16	58	63	64	67	68	68
19	68	72	74	77	77	77
22	75	80	83	86	87	87
25	83	88	91	92	93	94
32	94	99	104	108	113	113
40	113	129	144	157	166	175
50		182	224	256	279	304
60		235	304	361	400	443
70			431	521	585	635
75			466	574	650	737

Продовження таблиці 3.1

Товщина пиломате–ріалів, мм	Ширина пиломатеріалів, мм					
	40-50	60-70	80-100	110-130	140-180	більше 180 і необрізні
Осика, липа, тополя						
До 16	29	31	33	34	34	34
19	36	38	39	40	40	40
22	43	45	47	53	54	54
25	59	62	64	66	67	68
32	73	80	84	88	89	91
40	81	87	93	96	99	102
50		98	109	116	119	123
60		112	128	140	152	164
75			253	282	311	344
Береза, вільха						
До 16	36	37	37	38	39	39
19	44	45	47	47	48	48
22	50	51	53	54	55	55
25	67	73	78	81	83	84
32	81	85	88	91	92	94
40	93	96	100	101	105	107
50		115	130	141	149	158
60		155	187	213	231	249
75			377	420	463	514
Бук, клен, берест, ясень, ільм						
До 16	58	59	61	63	63	63
19	65	68	71	73	73	74
22	73	77	80	81	82	83
25	91	94	96	99	101	102
32	102	109	115	118	120	122
40	114	126	140	152	159	167
50		170	199	225	239	255
60		250	296	339	367	369
75			591	657	728	805

Продовження таблиці 3.1

Товщина пиломате–ріалів, мм	Ширина пиломатеріалів, мм					
	40-50	60-70	80-100	110-130	140-180	більше 180 і необрізні
Дуб, горіх, граб						
До 16	84	85	85	87	87	88
19	88	101	94	96	96	97
22	97	125	104	105	106	107
25	117	173	132	136	138	140
32	146	234	193	206	214	221
40	183	365	269	293	307	321
50		562	431	488	520	551
60			679	777	841	905
75			1086	1209	1343	1483

Таблиця 3.2 Значення коефіцієнта $A_{Ц}$, який враховує інтенсивність циркуляції повітря для камер з реверсивною циркуляцією

Добуток $\tau_{Вих} \cdot A_P$,	Швидкість циркуляції, м/с							
	0,2	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
20	3,14	1,80	1,0	0,78	0,63	0,54	0,49	0,46
40	2,40	1,65	1,0	0,81	0,67	0,59	0,54	0,52
60	2,03	1,58	1,0	0,84	0,71	0,64	0,60	0,58
80	1,76	1,42	1,0	0,85	0,76	0,72	0,68	0,67
100	1,56	1,32	1,0	0,88	0,81	0,79	0,78	0,77
140	1,31	1,15	1,0	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88
180	1,15	1,10	1,0	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
220 і більше	1,08	1,05	1,0	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95

Таблиця 3.3 Значення коефіцієнта A_B, який враховує початкову й кінцеву вологість пиломатеріалів

Початкова вологість,%	Кінцева вологість, %											
	22	20	18	16	14	12	11	10	9	8	7	6
120	1,07	1.12	1,18	1,25	1,33	1,43	1,49	1,55	1,61	1,68	1,76	1,86
110	1,00	1,06	1,12	1,20	1,28	1,37	1,43	1,49	1,55	1,62	1,71	1,81
100	0,94	1,00	1,06	1,14	1,22	1.31	1,37	1,43	1,50	1,57	1,65	1,75
90	0,87	0,93	1,00	1,07	1,16	1,25	1,30	1,36	1,43	1,51	1,58	1,68
80	0,80	0,86	0,93	1,00	1,09	1,18	1,23	1,29	1,35	1,43	1,51	1,61
70	0,72	0,78	0,84	0,92	1,00	1,10	1,15	1,21	1,27	1,35	1,43	1,52
65	0,67	0,74	0,80	0,87	0,96	1,05	1,10	1,16	1,23	1,30	1,38	1,48
60	0,62	0,68	0,75	0,82	0,91	1,00	1,05	1,11	1,18	1,25	1,33	1,43
55	0,57	0,63	0,69	0,77	0,85	0,94	1,00	1,06	1,12	1,20	1,28	1,38
50	0,51	0,57	0,63	0,71	0,79	0,89	0,94	1,00	1,06	1,14	1,22	1,32
45	0,44	0,50	0,57	0,64	0,73	0,82	0,87	0,93	1,00	1,07	1Л5	1,25
40	0,37	0,43	0,49	0,57	0,65	0,75	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	1,18
35	0,29	0,35	0,43	0,49	0,57	0,66	0,72	0,78	0,84	0,92	1,00	1,10
30	0,19	0,25	0,32	0,39	0,48	0,57	0,62	0,68	0,75	0,82	0,90	1,00
28	0,15	0,21	0,27	0,35	0,43	0,53	0,58	0,64	0,71	0,78	0,86	0,96
26	0,10	0,16	0,23	0,31	0,38	0,48	0,54	0,59	0,66	0,73	0,82	0,91
24	0,06	0,11	0,18	0,27	0,33	0,43	0,49	0,54	0,61	0,68	0,77	0,86
22	-	0,06	0,13	0,22	0,28	0,38	0,43	0,49	0,56	0,63	0,71	0,81
20	-	-	0,07	0,14	0,22	0,32	0,37	0,43	0,49	0,57	0,65	0,75

Таблиця 3.4 Значення коефіцієнта $A_Д$, який враховує відношення довжини пиломатеріалів до їх товщини

Відношення довжини заготовок до їх товщини	>40	35	30	25	20	15	10	7	5
$A_Д$	1	0,97	0,95	0,93	0,91	0,88	0,80	0,7	0,6

2 Якщо застосовуються режими сушіння відповідно до інших нормативно-технічних документів, то формула (3.1) коригується з урахуванням впливу температури деревини на її вологопровідність і початкової насиченості пари.

Перш за все, визначте найбільш близький режим відповідно до «Пиломатеріали хвойних і листяних порід. Режими сушіння в камерах періодичної дії» – як правило, це буде “найм’якіший” з наведених у цьому стандарті режимів.

Далі визначте температуру по мокрому термометру для вологості деревини близько 25% по заданому режиму і вибраному режиму згідно з «Пиломатеріали хвойних і листяних порід. Режими сушіння в камерах періодичної дії».

Відкоригована розрахункова формула (3.1) прийме вид:

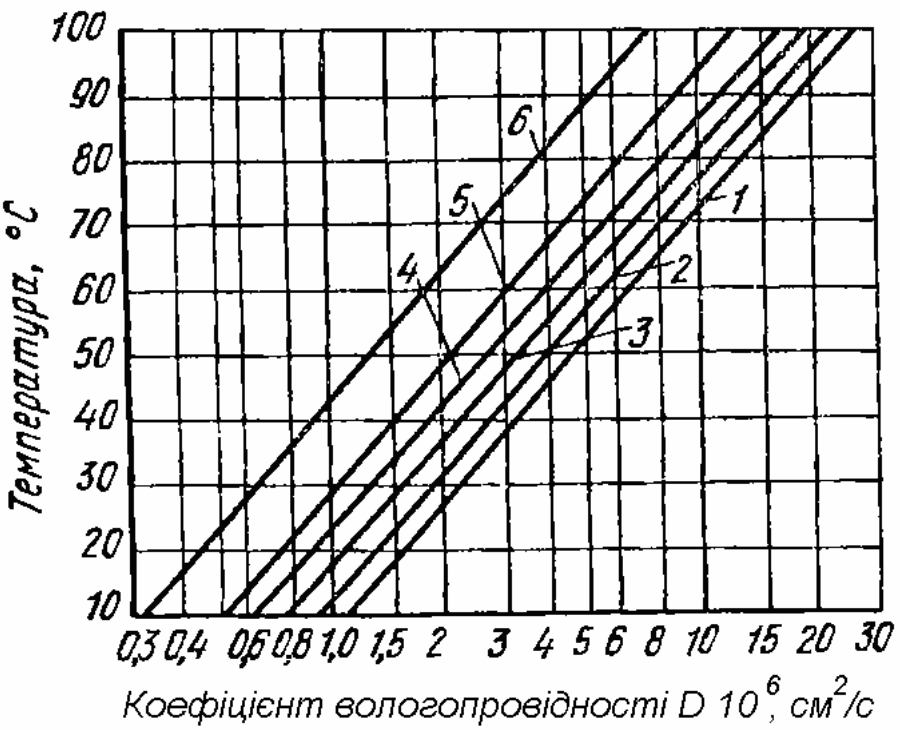
$$\tau_C = \tau_{Вих} A_P A_Ц A_B A_K A_Д \frac{\omega(t_{Ст})}{\omega(t_{Реж})} \cdot \frac{A_\varphi(\varphi_{Реж})}{A_\varphi(\varphi_{Ст})} \quad , \qquad (3.2)$$

де $\omega(t_{Ст})$ – вологопровідність деревини при температурі по мокрому термометру, відповідній режиму згідно з «Пиломатеріали хвойних і листяних порід. Режими сушіння в камерах періодичної дії» і вологості деревини близько 25%, см^2/с (рис. 3.2);

$\omega(t_{Реж})$ – вологопровідність деревини при температурі по мокрому термометру, відповідній заданому режиму сушіння і вологості деревини близько 25%, см^2/с (рис. 3.2);

$A_\varphi(\varphi_{Реж})$ – коефіцієнт, який враховує насиченість водяної пари на першій ступені заданого режиму (рис. 3.5);

$A_\varphi(\varphi_{Ст})$ – коефіцієнт, який враховує насиченість водяної пари на першій ступені режиму відповідно до «Пиломатеріали хвойних і листяних порід. Режими сушіння в камерах періодичної дії» (рис. 3.5).



1 – осина, 2 –ялина, 3 – береза, 4 – бук, 5 – модрина, 6 – дуб

Рис. 3.5 – Середні коефіцієнти дифузійної вологопровідності деревини (при вологості нижче 20-30%)

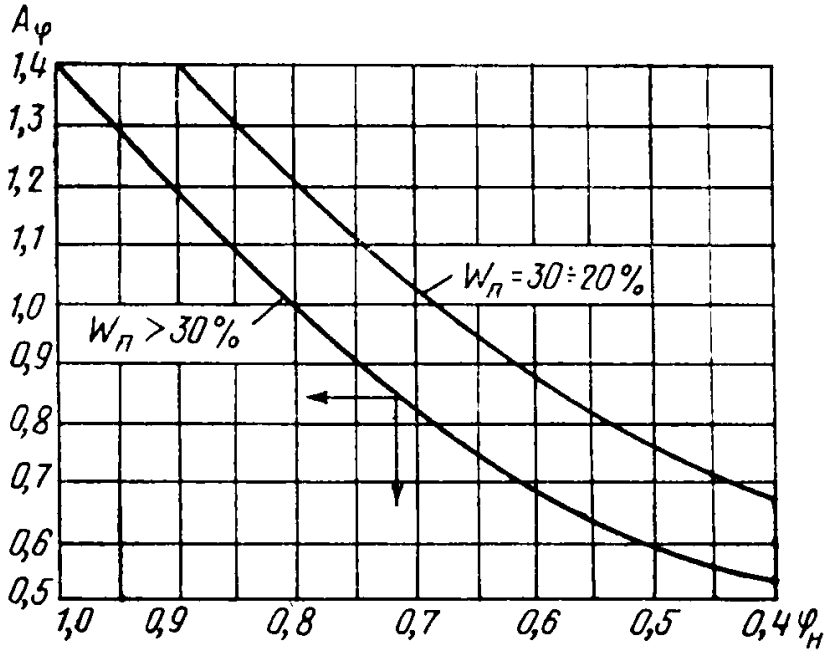


Рис. 3.6 – Залежність коефіцієнту $A\varphi$ від насиченості водяної пари на першій ступені сушіння на початкової вологості деревини.

Контрольні питання

1. Як визначається тривалість сушіння пиломатеріалів?
2. Як залежить тривалість сушіння від розмірів пиломатеріалів?
3. Як залежить вологопровідність деревини від температури?

Практична робота №4
РОЗРАХУНОК ПРОДУКТИВНОСТІ ТА НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ СУШИЛЬНИХ КАМЕР

Мета: навчитись розраховувати кількість сушильних камер, . необхідну для виконання виробничої програми.

Порядок виконання.

1. Тривалість камерообороту визначте для кожної породи деревини за формулою:

$$\tau_{KO} = \frac{\tau_C}{24} + \tau_Д \ , \qquad (4.1)$$

де τ_{KO} – тривалість камерообороту, діб;

$\tau_Д$ – тривалість допоміжних операцій (відкривання і закривання дверей сушильної камери; завантаження і вивантаження матеріалу із камери; огляд і очищення сушильної камери від бруду), діб (як правило, 0,1 доби).

Кількість камерооборотів за рік визначте за формулою:

$$\mathrm{n_{KO}} = \frac{365\,\mathrm{k_{вик}}}{\tau_{\mathrm{KO}}} \ , \qquad (4.2)$$

де $\mathrm{n_{KO}}$ – кількість камерооборотів за рік;

$\mathrm{k_{вик}}$ – коефіцієнт використання сушильної камери (0,92).

2. Визначення кількості пиломатеріалів, що знаходяться в сушильній камері

Сушильна камера повинна завантажуватися повногабаритно, щоб уникнути або звести до мінімуму паразитні потоки повітря повз штабелі.

Для *кожної* з порід деревини відповідно до виробничої програми визначається коефіцієнт об'ємного всихання деревини та об'ємне всихання пиломатеріалів:

$$К_{Об} = \beta_{Об} / 30\%, \tag{4.3}$$

$$У_{Об} = K_{Об} \frac{W_{TH} - W_K}{100\%}, \tag{4.4}$$

де $К_{Об}$ – коефіцієнт об'ємного всихання;

$\beta_{Об}$ – повне об'ємне всихання деревини (табл. 4.1);

$У_{Об}$ – об'ємне всихання пиломатеріалів;

W_{TH} – вологість точки насичення деревного волокна (30%);

W_K – кінцева вологість, %.

3. Об’єм деревини, який завантажують у камеру, та фактичний коефіцієнт об'ємного заповнення штабеля визначте для кожного різновиду пиломатеріалів, передбачених виробничою програмою:

$$Г = L B H n, \tag{4.5}$$

$$V_Д = Г \beta_T, \tag{4.6}$$

$$\beta_Ф = \beta_T (1 - У_{Об}), \tag{4.7}$$

де $Г$ – габаритний об’єм штабелів, м^3;

L – довжина штабеля, м;

B – ширина штабеля, м;

H –висота штабеля, м;

n – кількість штабелів у сушильній камері;

$V_Д$ – об’єм деревини, який завантажують у камеру, м^3;

β_T – табличне (вихідне) значення коефіцієнта об'ємного заповнення штабеля (табл. 4.2);

$\beta_Ф$ – фактичний коефіцієнт об'ємного заповнення штабеля.

Таблиця 4.1 – Показники щільності та всихання деревини

Порода	Щільність деревини, кг/м^3			Повне всихання, %			
	умовна	в абс. сухому стані	при W=12%	тангента-льне,	радіальне	аксіальне	об'ємне
Береза	520	620	640	9,36	5,20	0,52	14,56
Бук	560	650	680	10,08	5,60	0,56	15,68
В'яз	535	620	650	9,63	5,35	0,54	14,98
Граб	640	760	795	11,52	6,40	0,64	17,92
Груша	585	670	710	10,53	5,85	0,58	16,38
Дуб	570	655	690	10,26	5,70	0,57	15,96
Верба	380	425	455	6,84	3,80	0,38	10,64
Клен	570	655	690	10,26	5,70	0,57	15,96
Липа	400	475	495	7,20	4,00	0,40	11,20
Вільха	430	495	525	7,74	4,30	0,43	12,04
Горіх грецький	490	560	590	8,82	4,90	0,49	13,72
Осика	410	465	495	7,38	4,10	0,41	11,48
Тополя	375	425	455	6,75	3,75	0,38	10,50
Ясен	560	645	680	10,08	5,60	0,56	15,68
Ялина	365	420	445	6,57	3,65	0,36	10,22
Ялиця	350	400	425	6,30	3,50	0,35	9,80
Сосна	415	480	505	7,47	4,15	0,42	11,62
Модрина	540	635	685	9,72	5,40	0,54	14,12

Таблиця 4.2 Нормативні значення коефіцієнта об'ємного заповнення штабеля

Товщина пило–матері–алів, мм	Спосіб укладання								
	Зі шпаціями				Без шпацій				
	Обрізні		Необрізні		Обрізні			Необрізні	
	Товщина прокладок, мм								
	22	25	22	25	22	25	32	22	25
13	0,205	0,189	0,135	0,125	0,284	0,262	0,221	0,189	0,174
16	0,232	0,216	0,154	0,143	0,323	0,299	0,255	0,215	0,199
19	0,256	0,239	0,170	0,158	0,355	0,330	0,285	0,237	0,220
22	0,276	0,259	0,183	0,171	0,383	0,358	0,312	0,255	0,239
25	0,293	0,276	0,195	0,183	0,406	0,383	0,335	0,271	0,255
32	0,327	0,310	0,216	0,205	0,454	0,429	0,383	0,302	0,286
40	0,356	0,340	0,235	0,225	0,493	0,471	0,425	0,329	0,314
45	0,371	0,355	0,245	0,235	0,514	0,492	0,447	0,343	0,328
50	0,384	0,368	0,254	0,244	0,531	0,510	0,467	0,354	0,340
60	0,404	0,389	0,268	0,261	0,560	0,540	0,499	0,373	0,360
70	0,420	0,407	0,278	0,269	0,582	0,564	0,525	0,388	0,376
75	0,427	0,414	0,283	0,274	0,591	0,573	0,536	0,395	0,383
90	0,444	0,432	0,293	0,286	0,615	0,599	0,564	0,410	0,399
100	0,453	0,442	0,300	0,292	0,627	0,612	0,579	0,418	0,407

4 Визначення продуктивності сушильної камери у фактичному та умовному матеріалі

Продуктивність сушильної камери у фактичному матеріалі визначте окремо для *кожного* різновиду за формулою:

$$П_Ф = \frac{365 k_{вик}}{\tau_{КО}} Г \beta_Ф \quad , \tag{4.8}$$

де $П_Ф$ – продуктивність сушильної камери у фактичному матеріалі, м^3/рік .

Якщо виробничою програмою передбачається сушіння кількох різновидів пиломатеріалів, то розрахунок здійснюють, використовуючи продуктивність камери для умовного матеріалу. За умовний матеріал прийнято соснові обрізні дошки перетином 40х150 мм довжиною більше 1 м, які висушуються за другою категорією якості сушіння від

початкової вологості 60 % до кінцевої вологості 12% при швидкості циркуляції повітря 1 м/с.

Тривалість камерообороту при сушінні умовного матеріалу відповідно до «Пиломатеріали хвойних і листяних порід. Режими сушіння в камерах періодичної дії» нормальним режимом становить 4,3 доби, а м'яким режимом – 7,3 доби.

Якщо сушіння здійснюється за іншими нормативно-технічними документами, то тривалість камерообороту при сушінні умовного матеріалу можна прийняти дорівнюючою 7,3 доби.

Продуктивність сушильної камери для умовного матеріалу визначається за формулою:

$$П_У = \frac{365 k_{вик}}{\tau_{КО\ у}} Г\ \beta_У \quad , \qquad (4.9)$$

де $П_У$ – продуктивність сушильної камери для умовного матеріалу, м^3/рік;

$\tau_{КО\ у}$ – тривалість камерообороту при сушінні умовного матеріалу, діб;

$\beta_У$ – фактичний коефіцієнт об'ємного заповнення штабеля умовним матеріалом (0,438);

Відношення продуктивності сушильної камери в умовному матеріалі до продуктивності сушильної камери у фактичному матеріалі називають перевідним коефіцієнтом фактичного матеріалу в умовний, цей коефіцієнт обчисліть окремо *для кожного різновиду* пиломатеріалів:

$$K_i = \frac{П_У}{П_{Ф\ i}} \ , \qquad (4.10)$$

де K_i – перевідний коефіцієнт і-го фактичного матеріалу в умовний.

5 Визначення кількості сушильних камер для заданої програми сушіння

Щоб визначити кількість сушильних камер для заданої виробничої програми, слід весь асортимент висушуваного матеріалу перевести в умовний:

$$У = \sum_{i=1}^{i_{max}} K_i \, Ф_i \quad , \tag{4.11}$$

$$n_{кам} = \frac{У}{П_у} \quad , \tag{4.12}$$

де $У$ – об’єм умовного матеріалу, м^3;

i – порядковий номер пиломатеріалу;

i_{max} – кількість різновидів пиломатеріалів у виробничій програмі;

$Ф_i$ – об’єм і-го фактичного матеріалу, м^3;

$n_{кам}$ – необхідна кількість сушильних камер (заокруглити до цілого числа в більшу сторону).

Контрольні питання

1. Як визначається тривалість камерообороту?
2. Що таке умовний пиломатеріал?
3. Як визначити кількість сушарок, необхідних для виконання виробничої програми

Практична робота №5
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ АГЕНТУ СУШІННЯ

Мета: навчитись розраховувати масу вологи, яка випаровується із деревини в процесі сушіння, та визначати параметри агенту сушіння на вході в штабель і на виході з нього.

Порядок виконання.

1 Визначення маси вологи, яка випаровується із деревини в процесі сушіння

За розрахунковий матеріал приймають той пиломатеріал із заданої виробничої програми, який найшвидше висихає. Камери, розраховані на такий матеріал, матимуть потужніше теплове устаткування, яке забезпечить сушіння інших матеріалів зі специфікації.

У випадку будівництва нових сушильних камер або капітального ремонту з удосконаленням застарілих типів сушильних камер за розрахунковий матеріал слід приймати соснові (або з інших м'яких шпилькових порід) обрізні пиломатеріали товщиною 25 мм, шириною не менше 180 мм.

Маса вологи, яка випаровується з 1 м^3 пиломатеріалів та за один камерооборот визначається за формулами:

$$m_1 = \rho_У \frac{W_П - W_К}{100\%} \quad , \tag{5.I}$$

$$M_{КО} = m_1 \mathrm{V_Д} \quad , \tag{5.2}$$

де m_1 – маса вологи, яка випаровується з 1 м^3 пиломатеріалів, завантажених у камеру, кг;

$\rho_У$ – умовна (базова) щільність деревини (табл. 4.1), кг/ м^3;

$W_П$ – початкова вологість пиломатеріалів, %.

$M_{КО}$ – маса вологи, яка випаровується за один камерооборот, кг.

Середня швидкість випаровування вологи при сушінні визначається за формулою:

$$\upsilon_С = \frac{M_{КО}}{3600\,\tau_С} \quad , \tag{5.3}$$

$\upsilon_С$ – швидкість випаровування вологи при сушінні, кг/с.

Оскільки швидкість випаровування вологи не є постійною, то її розрахункове (найбільше) значення обчислюють за формулою:

$$\upsilon_Р = \upsilon_С \chi \quad , \tag{5.4}$$

де $\upsilon_Р$ – розрахункова швидкість випаровування вологи, кг/с;

χ – коефіцієнт нерівномірності сушіння (1,1 при $W_К$=16–20%, 1,2 при $W_К$=12–15%, 1,3 при $W_К$<12%).

2 Визначення параметрів агенту сушіння на вході в штабель

Програми сушіння пиломатеріалів містять певні залежності параметрів середовища (температура та насиченість водяної пари) на вході в штабель пиломатеріалів від вологості деревини. У зв'язку із тим, що в процесі сушіння параметри середовища змінюються, то для розрахунку приймають ступінь програми сушіння, відповідну поточній вологості деревини 20–25%..

Запишіть параметри агенту сушіння, наведені у програмі сушіння.

Якщо у програмі сушіння насиченість водяної пари не вказана, а замість неї наведена психрометрична різниця температур або рівноважна вологість деревини, то необхідно визначити насиченість водяної пари, користуючись таблицею для визначення насиченості чи діаграмою рівноважної вологості деревини.

Тиск насичення P_H водяної пари при температурі, відповідній даній ступені сушіння, визначте по табл. 5.1.

Парціальний тиск водяної пари та вологовміст визначте за формулами:

$$P_1 = \varphi_1 \, P_H(t_1) \ , \tag{5.5}$$

$$d_1 = 622 \frac{P_1}{P_A - P_1} \ , \tag{5.6}$$

де P_1 – парціальний тиск водяної пари в повітрі на вході в штабель, Па;

t_1 – температура повітря на вході в штабель, °С;

φ_1 – насиченість водяної пари на вході в штабель;

P_H – тиск насичення при температурі, відповідній даній ступені сушіння, Па (табл. 5.1);

d_1 – вологовміст повітря на вході в штабель, г/кг;

P_A – атмосферний тиск, Па (10^5 Па).

Тепловміст, густину та приведений питомий об'єм повітря (який приходиться на 1 кг сухого повітря) визначте за формулами:

$$J_1 = [1{,}0\, t_1 + 0{,}001\, d_1 (1{,}93\, t_1 + 2490)] \cdot 1000 \ , \tag{5.7}$$

$$\rho_1 = \frac{349 - 132 \dfrac{d_1}{622 + d_1}}{273 + t_1} \ , \tag{5.8}$$

$$v_1 = 4{,}62 (273 + t_1)(622 + d_1) 10^{-6}, \tag{5.9}$$

де J_1 – тепломісткість повітря на вході в штабель, Дж/кг;

ρ_1 – густина повітря на вході в штабель, кг/м^3;

v_1 – приведений питомий об'єм повітря на вході в штабель, м^3/кг.

Таблиця 5.1 – Залежність тиску насичення водяної пари від температури

Температура, °С	Тиск, Па	Температура, °С	Тиск, Па
0	328	52	13613
2	705	54	14999
4	813	56	16505
6	934	58	18145
8	1073	60	19918
10	1227	62	21838
12	1403	64	23905
14	1599	66	26144
16	1817	68	28558
18	2064	70	31157
20	2339	72	33944
22	2650	74	36957
24	2984	76	40187
26	3361	78	43636
28	3780	80	47343
30	4242	82	51316
32	4754	84	55569
34	5320	86	60145
36	5941	88	64941
38	6619	90	70101
40	7376	92	75594
42	8199	94	81447
44	9104	100	101822
46	10087	110	143255
48	11160	120	198506
50	12334	130	263075

Примітка. Для проміжних значень температури тиск насичення знаходять методом інтерполяції.

3 Визначення об'єму і маси циркулюючого повітря в сушильній камері

Коефіцієнт заповнення штабеля по висоті визначається за формулою:

$$\beta_{Вис} = \frac{S}{S + S_{Пр}} \ , \qquad (5.10)$$

$\beta_{Вис}$ – коефіцієнт заповнення штабеля по висоті;

S – товщина пиломатеріалів, мм;

$S_{Пр}$ – товщина прокладок, мм.

Сумарний живий перетин штабелів визначається за формулою:

$$F_{Ж} = L\ H\ n_{Перп}(1 - \beta_{Вис}) \ , \qquad (5.11)$$

де $F_{Ж}$ – живий перетин штабелів, м^2;

$n_{Перп}$ – кількість штабелів у ряді, розміщеному перпендикулярно до повітряного потоку;

Потік циркулюючого повітря визначається з урахуванням швидкості циркуляції, наведеній у технічній документації сушильної камери (раціональні значення швидкості циркуляції повітря знаходяться в межах 1–3 м/с):

$$V_{П} = \upsilon\ F_{Ж}\ k_{Зап} \ , \qquad (5.12)$$

де $V_{П}$ – потік повітря, м^3/с;

υ – швидкість циркуляції повітря через штабель м/с ;

$k_{Зап}$ – коефіцієнт запасу повітря для компенсації паразитних потоків повітря та його нерівномірного розподілу по штабелю (1,1–1,2 для сучасних камер, 1,3...1,7 для камер застарілих конструкцій).

Маса циркулюючого в сушильній камері повітря, яка потрібна для випаровування 1 кг вологи, визначається за формулою:

$$m_{Ц} = \frac{V_{П}}{\upsilon_{P}\ \nu_{I}} \ , \qquad (5.13)$$

де $m_{Ц}$ – маса циркулюючого повітря, яка потрібна для випаровування 1 кг вологи, кг/кг.

Оскільки процес сушіння (випаровування повітрям вологи) відбувається практично з постійним тепловмістом, то тепловміст

повітря на виході зі штабеля J_2 приблизно дорівнює тепловмісту на вході J_1.

Це дає змогу обчислити параметри повітря на виході зі штабеля:

$$d_2 = d_1 + \frac{1000}{m_Ц} \quad , \tag{5.14}$$

$$t_2 = \frac{J_2 / 1000 - 2{,}49 d_2}{1{,}0 + 0{,}00193 d_2}, \tag{5.15}$$

де d_2 – вологовміст повітря на виході зі штабеля, г/кг;

t_2 – температура повітря на виході зі штабеля, °С.

Маса свіжого повітря на 1 кг випаруваної вологи (вона співпадає з масою відпрацьованого повітря) визначається за формулою

$$m_0 = \frac{1000}{d_2 - d_0} \quad , \tag{5.16}$$

де m_0 – маса свіжого повітря на 1 кг випаруваної вологи, кг;

d_0 – вологовміст свіжого повітря, г/кг (у середньому – 6..7 г/кг).

Потік свіжого (припливного) повітря визначається за формулою:

$$V_0 = \upsilon_P \, m_0 v_0 \quad , \tag{5.17}$$

де V_0 – потік свіжого повітря, м^3/с;

v_0 – приведений питомий об'єм свіжого повітря, м^3/кг (0,87 м^3/кг).

У практичних розрахунках приймають, що густина повітря на виході зі штабеля та його питомий об’єм дорівнюють відповідним параметрам повітря на вході в штабель.

Потік відпрацьованого повітря визначається за формулою:

$$V_2 = \upsilon_P \, m_0 v_2 \quad , \tag{5.18}$$

де V_2 – потік відпрацьованого повітря, м^3/с;

v_2 – приведений питомий об'єм відпрацьованого повітря, м^3/кг.

Площу поперечного перетину витяжних каналів визначте, виходячи з потоку відпрацьованого повітря.

Контрольні питання

1. Як обчислити масу вологи, яка випаровується із деревини в процесі сушіння?
2. Як обчислити масу вологи, яка випаровується з 1 $м^3$ пиломатеріалів та за один камерооборот?
3. Як обчислити середню швидкість випаровування вологи при сушінні?
4. Як визначити парціальний тиск водяної пари на певній ступені режиму сушіння?

Практична робота №6
ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НА ПРОЦЕС СУШІННЯ

Мета: навчитись розраховувати питомі та загальні витрати теплової енергії на сушіння пиломатеріалів.

Короткі пояснення.

У процесі сушіння теплова енергія витрачається на нагрівання матеріалу перед сушінням, на випаровування вологи із деревини, на проміжну та кондиціонуючу тепловологообробки, на втрати тепла через огородження, на нагрівання свіжого повітря, огородження камери, транспортного та іншого обладнання, яке знаходиться в сушильній камері.

Кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання огородження камери, свіжого повітря, транспортного та іншого обладнання сушильної камери вважається як не врахована й за середніми статистичними даними складає 15–30 % від врахованих витрат теплоти.

Витрати теплоти на сушіння деревини визначте окремо для зимових (для розрахункової температури опалення) та середньорічних умов. Результати, одержані для зимових умов, використовуються для розрахунку потужності нагрівачів, а за середньорічними умовами – для визначення сумарних витрат теплової енергії на сушіння 1 $м^3$ пиломатеріалів.

Порядок виконання

1 Визначення витрат енергії на початкове нагрівання деревини

Питому витрату теплової енергії на нагрівання 1 м^3 пиломатеріалів у середньорічних умовах визначте за формулою:

$$q_{HC} = \rho_П \, [t_K - t_C] \, C_C \ , \qquad (6.1)$$

де q_{HC} – питома витрата теплоти на нагрівання пиломатеріалів у середньорічних умовах, Дж/м^3;

$\rho_П$ – щільність деревини при початковій вологості, кг/м^3 (див. рис. 6.1);

t_K – кінцева (максимальна) температура нагрівання деревини, °С;

t_C – середньорічна температура (табл. 6.1), °С;

C_C – середня питома теплоємність деревини для діапазону температур від середньорічної до кінцевої, Дж/(кг·°С) – див. рис. 6.2.

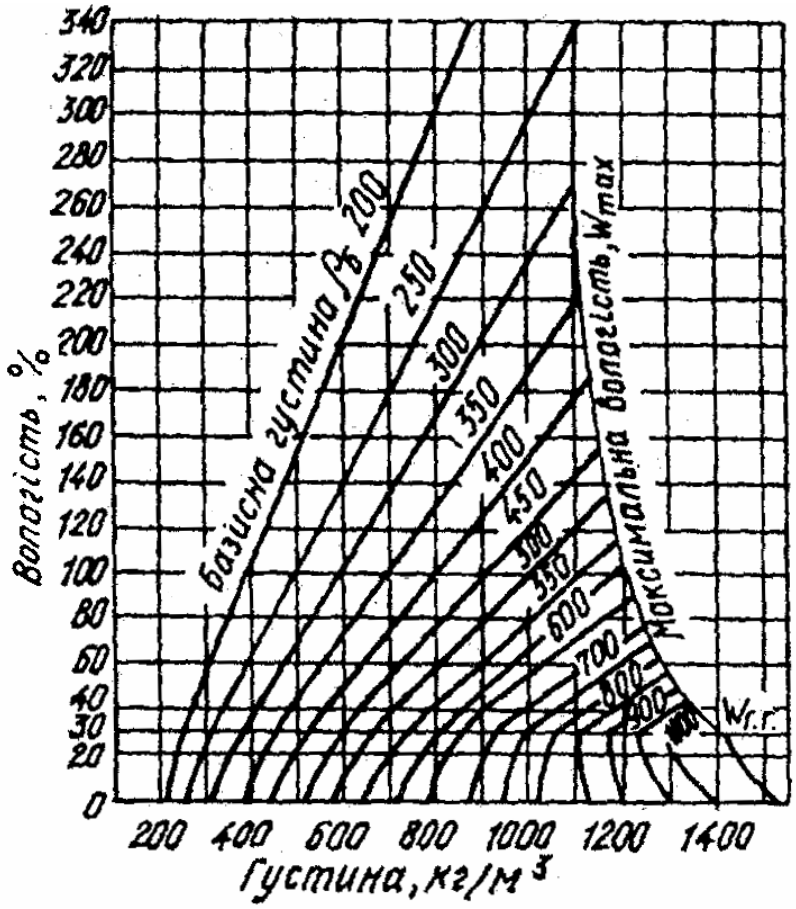


Рис. 6.1 – Залежність щільності деревини від вологості

Таблиця 6.1 – Кліматичні дані

Назва міста	Розрахункова температура для опалення, °С	Середня річна температура, °С
Вінниця	-20	6,9
Дніпропетровськ	-20	6,9
Донецьк	-24	6,8
Житомир	-20	6,7
Запоріжжя	-19	6,6
Івано-Франківськ	-21	7,1
Київ	-20	6,9
Кіровоград	-19	9,1
Луганськ	-25	6,9
Луцьк	-23	7,0
Львів	-22	7,0
Миколаїв	-16	9,3
Одеса	-16	9,3
Полтава	-21	6,6
Рівне	-23	7,0
Сімферополь	-12	10,5
Суми	-22	8,0
Тернопіль	-21	7,0
Ужгород	-18	9,2
Харків	-25	6,7
Херсон	-16	9,5
Хмельницький	-22	7,0
Черкаси	-20	6,9
Чернівці	-19	8,0
Чернігів	-23	6,6

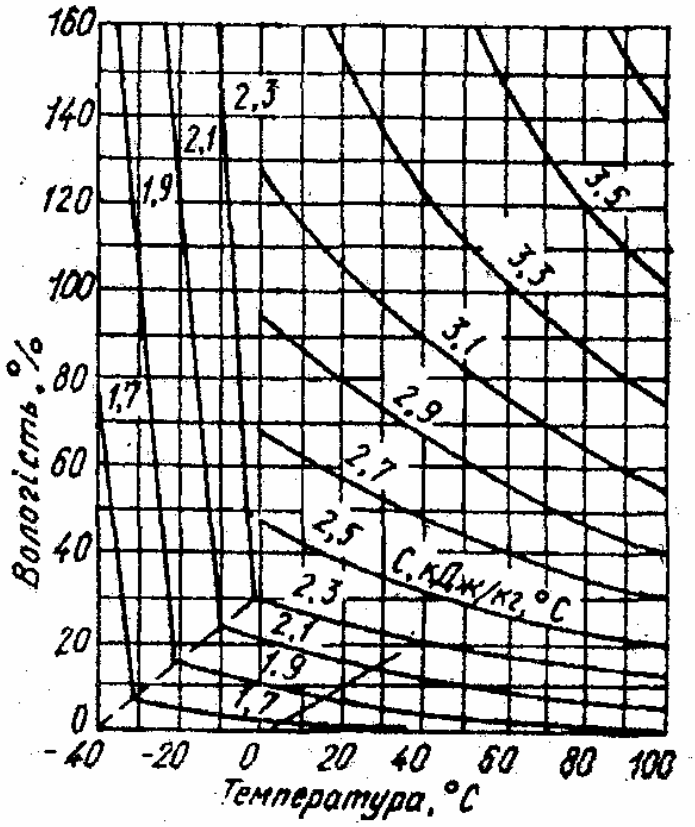


Рис. 6.2 – Залежність теплоємності деревини від температури

2. Питому витрату теплової енергії на нагрівання 1 м^3 пиломатеріалів у зимових умовах визначте за формулою:

$$q_{НЗ} = \gamma\, \rho_У \frac{W_П - W_{НЗ}}{100\%} + \rho_П\, [-t_П C_М + C_П t_К]\ , \qquad (6.2)$$

де $q_{НЗ}$ – питома витрата теплової енергії на нагрівання пиломатеріалів у зимових умовах, Дж/м^3;

γ – питома теплота плавлення льоду, Дж/кг ($335\cdot10^3$ Дж/кг);

$W_П$ – початкова вологість пиломатеріалів, %;

$W_{НЗ}$ – уміст незамерзлої вологи в деревині, % (див. рис. .6.3);

$t_П$ – температура деревини на початку нагрівання (розрахункова температура опалення), °С;

$C_М$ – середня питома теплоємність деревини для мінусових температур, Дж/(кг·°С) – див. рис. 6.2 для температури $t_0/2$;

$C_П$ – середня питома теплоємність деревини для плюсових температур, Дж/(кг·°С) – див. рис. 6.2 для температури $t_К/2$;

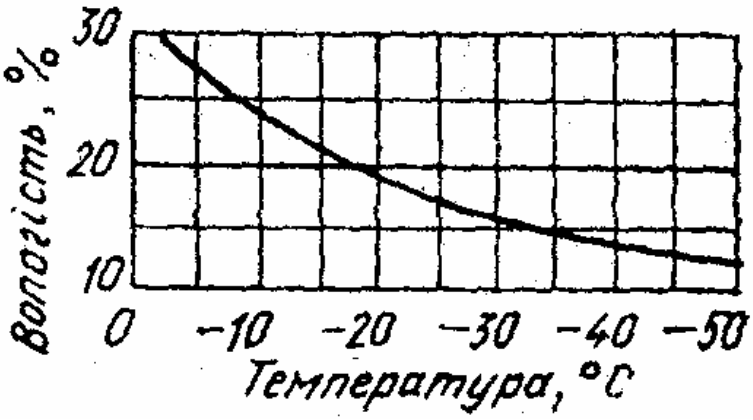


Рис. 6.3 – Графік умісту незамерзлої вологи в деревині

3. Витрати енергії на нагрівання всього об'єму деревини, що є в сушильній камері, визначаються за формулами:

$$Q_{HC} = q_{HC} V_Д \quad , \tag{6.3}$$

$$Q_{H3} = q_{H3} V_Д \quad , \tag{6.4}$$

де Q_{HC} – витрати енергії на нагрівання деревини в середньорічних умовах, Дж;

Q_{H3} – витрати енергії на нагрівання деревини в зимових умовах, Дж.

4. Визначення витрат енергії на випаровування вологи з деревини

Питомі витрати теплоти на випаровування вологи в процесі сушіння пиломатеріалів (на 1 кг вологи) визначається за формулою:

$$q_B = m_0(J_2 - J_0) - c_B t_M \quad , \tag{6.5}$$

де q_B – питомі витрати теплоти на випаровування вологи, Дж/кг;

J_0 – тепломісткість свіжого повітря, $J_0 = 46 \cdot 10^3$ Дж/кг;

c_B – теплоємність води, $c_B = 4190$ Дж/(кг·°С);

t_M – температура деревини, яку приймають за температуру змоченого термометра відповідно режиму, °С.

Витрати теплоти на випаровування вологи із пиломатеріалів визначте за формулою:

$$Q_B = q_B \, M_{KO} \quad , \tag{6.6}$$

де Q_B – витрати теплоти на випаровування вологи із пиломатеріалів, Дж.

Потужність, необхідна для випаровування вологи:

$$P_B = q_B \, \upsilon_P \quad , \tag{6.7}$$

де P_B – потужність, необхідна для випаровування вологи, Вт.

5. Визначення витрат енергії через огородження

Втрати тепла через огородження розраховують для зимових та середньорічних умов.

Проміжні результати розрахунку доцільно заносити в таблицю, яка складається з таких стовпців:

- назва огородження;
- довжина огородження, м;
- висота (ширина) огородження, м;
- площа огородження, м^2;
- товщина 1-го шару огородження, м;
- теплопровідність 1-го шару огородження, Вт/(м·°С);
- товщина 2-го шару огородження, м;
- теплопровідність 2-го шару огородження, Вт/(м·°С);
- товщина 3-го шару огородження, м;
- теплопровідність 3-го шару огородження, Вт/(м·°С);
- коефіцієнт теплопередачі огородження, Вт/(м^2·°С).

Коефіцієнт теплопередачі багатошарових огороджень визначається за формулою:

$$\kappa_{Oг} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{Вн}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \cdots \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{Зовн}}} \quad , \tag{6.8}$$

де $\kappa_{Oг}$ – коефіцієнт теплопередачі огородження, Вт/(м^2·°С);

$\alpha_{Вн}$ – коефіцієнт теплообміну внутрішньої сторони огородження, $\alpha_{Вн}$=25–28 Вт/(м^2·°С);

$\alpha_{Зовн}$ – коефіцієнт теплообміну зовнішньої сторони огородження – для огородження, яке виходить назовні, $\alpha_{Зовн}$=23 Вт/(м^2·°С); для

огородження, яке виходить у приміщення, яке не отоплюють, $\alpha_{\text{Зовн}}$=12 Вт/(м^2·°С); для огородження, яке виходить у приміщення, яке отоплюють, $\alpha_{\text{Зовн}}$=9 Вт/(м^2·°С);

δ_i – товщина і-го шару огородження, м;

λ_i – теплопровідність і-го шару огородження, Вт/(м·°С) – див. табл. 6.2;

Таблиця 6.2 – Теплопровідність деяких матеріалів

Матеріал	Густина, кг/м^3	Теплопровідність, Вт/(м·°С)
Азбест	400	0,12
Азбоцементні плити	500	0,13
Алюміній	2700	240,00
Бетони:		
- із щебенем або гравієм	2400	1,45
- із цегляним щебенем	2000	1,05
- залізобетон	2400	160
- пінобетон	1000	0,40
-//-	300	0,13
- шлакобетон (на котельних шлаках)	1600	0,76
-//-	1000	0,41
Вата мінеральна	200	0,07
Скловата	200	0,07
Войлок будівельний	150	0,06
Картон азбестовий	900	0,22
Пінополістирол	–	0,038-0,042
Пінополіуретан	40-250	0,019-0,035
Руберойд, пергамент, толь	600	0,17
Сталь будівельна	7850	58,00
Цегляна кладка	1800	0,80
Шлак паливний	1000	0,29
Шлакова цегла	1400	0,58
Штукатурка цементно-пісочна	1800	0,90
Штукатурка гіпсова (суха)	1000	0,23

Рекомендується, щоб коефіцієнт теплопередачі стін нових сушильних камер знаходився в межах 0,4–0,6 Вт/(м^2·°С), стелі – не повинен перевищувати 0,6 Вт/(м^2·°С) для того, щоб запобігти конденсації вологи на її внутрішній поверхні, а для дверей камери – не повинен перевищувати 2,3 Вт/(м^2·°С).

Для підлоги коефіцієнт теплопередачі приймають у два рази меншим, ніж для зовнішніх стін. За охолоджуючу поверхню полу приймають смугу шириною 1 м вздовж зовнішніх стін. Втрати тепла через бокову стінку між двома камерами не враховують (окрім камер, розташованих окремо одна від одної).

Втрати тепла через огородження (стіни, стелю, підлогу, двері) характеризуються потужністю, яка визначається окремо для кожного елемента за формулою:

$$P_{Oг} = S_{Oг}\,к_{Oг}\,(t_P - t_З)\ , \qquad (6.9)$$

де $P_{Oг}$ – потужність теплових втрат через окреме огородження, Вт;

$S_{Oг}$ – площа кожного окремого огородження, м^2;

t_P – температура середовища в сушильній камері, відповідно до режиму, °С;

$t_З$ – температура середовища із зовнішньої сторони огородження, °С.

Проміжні дані та результати розрахунку втрат енергії через огородження зводять у таблицю за формою, наведеною в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Розрахунок втрат тепла через огородження камери

Назва огород–ження	Кількість	$S_{Oг}$, м^2	$к_{Oг}$, Вт/ м^2·°С	t_P, °С	$t_З$, °С		$t_P - t_З$, °С		$P_{Oг}$, Вт	
					Зимова	Середньо–річна	Зимова	Середньо–річна	Зимове	Середньо–річне

Заповнивши табл. 6.3, розраховують сумарну потужність теплових втрат (через всі огородження).

Енергія, яка витрачається через огородження, обчислюється за формулою (тривалість сушіння повинна бути виражена в секундах):

$$Q_{Oг} = P_{OгΣ}\ \tau_C \ , \qquad (6.10)$$

де $Q_{Oг}$ – енергія, яка витрачається через огородження, Дж;

$P_{OгΣ}$ – сумарна потужність теплових втрат через всі огородження, Вт.

Сумарні витрати енергії на сушіння обчислюють для середньорічних і зимових умов за формулами:

$$Q_C = (\ Q_{HC} + Q_{Oг\ C} + Q_B)\ K_{Дод} \ , \qquad (6.11)$$

$$Q_З = (\ Q_{HЗ} + Q_{Oг\ З} + Q_B)\ K_{Дод} \ , \qquad (6.12)$$

де Q_C – сумарні витрати енергії на сушіння в середньорічних умовах, Дж;

$Q_З$ – сумарні витрати енергії на сушіння в зимових умовах, Дж.

$K_{Дод}$ – коефіцієнт, який враховує додаткові витрати теплоти на початковий прогрів камери, транспортних засобів і обладнання в середині сушильної камери, втрати теплоти з відпрацьованим повітрям тощо, $K_{Дод}$=1,15...1,3.

6 Розрахунок теплообмінника сушильної камери

До теплового обладнання сушильної камери відноситься калорифер (теплообмінник), трубопроводи, запірна та регулююча арматура, манометри, витратоміри тощо.

Вибір і розрахунок теплового обладнання залежить від конструкції сушильної камери, її продуктивності, джерела теплової енергії та інших чинників. Як показав світовий досвід експлуатації конвективних сушильних камер періодичної дії, найбільш економним є застосування гарячої води як теплоносія в системах теплопостачання.

Максимальну теплову потужність, яку калориферам необхідно віддавати, визначте для зимових умов за формулою:

$$P_K = (\ P_{OгΣ} + P_B)\ K_{Дод} \ , \qquad (6.13)$$

де P_K – теплова потужність калориферів.

Витрату гарячої води через теплообмінник визначте для зимових умов за формулою, виходячи з того, що температура теплоносія зменшується в теплообміннику на 10-20 °С:

$$V_B = \frac{P_K}{\rho_B c_B (t_{Bx} - t_{Bux})} \quad , \tag{6.14}$$

де V_B – максимальна витрата гарячої води, м^3/с;

ρ_B – густина води, кг/м^3;

c_B – теплоємність води, 4210 Дж/(кг·К);

t_{Bx} – температура води на вході в сушильну камеру, 90-95°С;

t_{Bux} – температура води на виході із сушильної камери, °С.

Контрольні питання

1. Як обчислити витрати енергії на початкове нагрівання деревини?
2. Як обчислити витрати енергії на випаровування вологи з деревини?
3. Як обчислити витрати енергії через огородження?

Практична робота №7
ВИЗНАЧЕННЯ СОБІВАРТОСТІ СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ

Мета: навчитись здійснювати розрахунки складових собівартості та загальну собівартість сушіння пиломатеріалів

Короткі пояснення.

При виконанні контрольно-тестового завдання собівартість сушіння визначте для того ж виду пиломатеріалу, для якого здійснювався тепловий розрахунок.

При визначенні собівартості враховуватимемо такі складові:

– витрати на паливо;

– витрати на електроенергію для вентиляторів;

– витрати на заробітну плату та відрахування;

– витрати на амортизацію сушильної камери.

Всі ці складові собівартості обчислюються за камерооборот.

1. Визначення кількості палива здійснюють, виходячи з витрат енергії на сушіння в середньорічних умовах (з урахуванням того, що електроенергія, спожита внутрішніми вентиляторами, обігріває сушильну камеру) та нижчої теплотворної здатності палива (для дерев'яного палива – 11700 кДж/кг).

2. При розрахунку витрат на заробітну плату та відрахування проміжні результати доцільно зводити в таблицю 7.1. Кількість штатних одиниць персоналу сушильного цеху (дільниці) визначається відповідно до додатку

Таблиця 7.1 – Витрати на заробітну плату та відрахування

Посада	Кількість працюючих	Посадовий оклад, грн	Заробітна плата, грн	Відрахування, грн.

Витрати на амортизацію розраховують за формулою:

$$C_A = Ц_{СК} k_M k_{ТО} \frac{\tau_C}{24 \cdot 365 T_{Сл} k_{Вик}} \quad , \qquad (7.1)$$

де C_A – витрати на амортизацію, грн;

$Ц_{СК}$ – вартість сушильної камери, грн;

k_M – коефіцієнт, що враховує вартість транспортування, монтажу та пусконалагоджувальних робіт (k_M=1,15) ;

$k_{ТО}$ – коефіцієнт, що враховує вартість технічного обслуговування та ремонтних робіт ($k_{ТО}$=1,1) ;

$T_{Сл}$ – розрахунковий термін служби сушильної камери, років.

Собівартість сушіння відносять до 1м^3 висушених пиломатеріалів.

Контрольні питання

1. Які складові собівартості сушіння пиломатеріалів?
2. Як обчислюються складові собівартості сушіння пиломатеріалів?

Список використаних джерел

1. Білей П.В., Павлюст В.М. Сушіння та захист деревини. Підручник. –Львів: ТзОВ “Кольорове небо”, 2008. -312 с.

2. Білей П.В., Соколовський І.А., Павлюст В.М., Куninець Є.П. Керівні технічні матеріали з технології камерного сушіння пиломатеріалів. –Ужгород: Карпати, 2010. –140с.

3. Тепломасообмінні процеси деревообробки : підручник / Білей П. В., Петришак І. В., Соколовський І. А., Сорока Л. Я. Львів: ЗУКЦ, 2013. 376 с.

4. Гербей В.М., Озарків І.М. та ін. Основи проектування сушильних цехів у деревообробній промисловості. –Львів: ОліС плюс, 1996. –191 с.

5. Сучасне лісосушильне та лісопильне устаткування / О.О.Пінчевська, З.С.Сірко, В.С.Коваль, Н.В.Марченко. –Харків: ПФ “Центрінформ”, 2005. –176 с.

6. Божок О.П., Вінтонів І.С. Деревинознавство з основами лісового товарознавства. – К.: НМК ВО 1992. – 320 с.

Навчальне видання

ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ ТА ЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ

Методичні вказівки
до виконання практичних робіт

Укладач:
ШЕВЧЕНКО Сергій Анатолійович

Формат 60х84 /16. Гарнітура Times New Roman
Папірдля цифрового друку. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк._.
Наклад___пр.
Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 4