



Пінчевська О.О.  
Спірочкін А.К.

О.О. Пінчевська, А.К. Спірочкін ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ І ЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ. ЧАСТИНА 1



Розраховано на фахівців з технологій оброблення деревини, бакалаврів та магістрантів навчальних закладів спеціальності «Деревообробні та меблеві технології».

☎ 044 527 81 67

🌐 <https://nubip.edu.ua/node/1163>

📍 м. Київ, пров. Сільськогосподарський, 14

2021  
**2021** ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ  
Навчальний І ЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ  
**ПОСІБНИК** ЧАСТИНА 1

## УДК 674.047.3

### П79

*Рекомендовано до друку вченою радою Національного університету біоресурсів і природокористування України (протокол № 3 від 27 жовтня 2021 року)*

#### **Автори:**

**Пінчевська О. О.**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій та дизайну виробів з деревини (Національний університет біоресурсів і природокористування України);

**Спірочкін А. К.** кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій та дизайну виробів з деревини (Національний університет біоресурсів і природокористування України);

#### **Рецензенти:**

**Цапко Ю.В.**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри технологій та дизайну виробів з деревини (Національний університет біоресурсів і природокористування України);

**Szymon Glowacki**, Dr hab. inż. of Institute of Mechanical Engineering (Warsaw University of Life Sciences, Warsaw, Poland);

**Гуцол Т.Д.**, доктор технічних наук, професор, професор кафедри механіки та інженерії агроєкосистем (Поліський національний університет, м.Житомир).

Пінчевська О.О., Спірочкін А.К. Технологія сушіння і захисту деревини. Частина 1. Навчальний посібник. Київ: вид-во, 2021.Ч.1.171 с.

Наведені властивості деревини, що мають відношення до процесів впливу теплоти під час теплової обробки, сушіння та консервування. Розглянуто властивості агентів оброблення деревини – водяної пари та повітря. Представлено способи нагрівання деревини та розрахунки тривалості процесу із врахуванням фізичних закономірностей процесів нагрівання деревини із вмістом вологи різних агрегатних станів. Проведено детальний аналіз рушійних сил переміщення вологи у деревині під час сушіння, визначено причини утворення та розвитку сушильних напружень у пиломатеріалі під час конвекційного сушіння, обґрунтовано структуру режимів сушіння пилопродукції. Наведено сучасні конструкції конвекційних сушарок.

Розраховано на фахівців з технологій оброблення деревини, бакалаврів та магістрантів навчальних закладів спеціальності «Деревообробні та меблеві технології».

УДК 674.047.3

©Пінчевська О. О.,

©Спірочкін А.К.

©НУБіП України, 2021

## ВСТУП

Процеси сушіння та захисту деревини супроводжуються впливом на неї теплоти вологого повітря (газу або рідини), які використовуються для зміни температури та вологості деревини або введенням в неї речовин, що покращують її технологічні та експлуатаційні властивості. Дію вищенаведених чинників на деревину можна характеризувати як гідротермічне оброблення. Під час цих процесів змінюються лише фізичні властивості деревини, структура та хімічні властивості її залишаються без змін. В основі гідротермічного оброблення лежать фізичні явища перенесення, а саме тепло- та масообмін деревини з оточуючим середовищем. За особливостями та призначенням вони поділяються на такі групи: процеси теплового оброблення; процеси сушіння та процеси просочування.

Предметом даної дисципліни є вивчення технології процесів гідротермічного оброблення деревини, обладнання, що застосовується для цих процесів, основ теорії теплового оброблення, сушіння та просочування, без розуміння яких неможливо отримати якісний продукт, а також раціонально використовувати обладнання.

**Теплова обробка.** Ці процеси пов'язані з нагріванням деревини і підтриманням температури на заданому рівні протягом часу. Вони викликають зміну деяких фізико-механічних властивостей деревини, що обумовлено технологічними цілями теплової обробки, а саме:

- зниження зусиль та підвищення якості різання деревини внаслідок зменшення її твердості при нагріванні (розморожування і нагрівання колод, кряжів, оцупків перед розпилюванням, луценням, струганням шпона);
- створення можливості зміни форми деталей або заготовок під дією механічних зусиль внаслідок збільшення еластичності при нагріванні деревини перед гнуттям або пресуванням;
- прискорення процесів склеювання внаслідок інтенсифікації твердження і висихання клейових речовин, нанесених на підігріту деревини.

**Сушіння деревини.** Процес видалення з матеріалу вологи шляхом її випаровування або випарювання. Вологість деревини, з якої виготовляють вироби та споруди стабільних розмірів та форми, повинна заздалегідь бути зниженою до величини, що відповідає умовам експлуатації. Волога деревина гниє; при зниженні вологості зменшується маса і одночасно підвищується міцність; суха деревина краще склеюється та оброблюється. Технологічні цілі сушіння: попередження змінювання форми та розмірів деталей; запобігання гниттю; зменшення маси та підвищення міцності; покращення склеювання та опорядження.

**Просочування деревини.** Найбільше значення мають процеси консервування та вогнезахист деревини, які застосовують переважно у будівництві, залізничному господарстві та гірничорудній промисловості.

Консервування – оброблення деревини на довготривалий термін, що підвищує її стійкість проти дереворуйнуючих комах, грибів. Для цього у деревину вносять захисні речовини. Сушіння теж запобігає гниттю, але за умови виключення подальшого зволоження виробу під час експлуатації. Якщо деревина використовується в виробках і спорудах на відкритому повітрі, її стійкість проти гниття може бути забезпечена лише консервуванням.

Задача вогнезахисту – запобігти руйнуванню вогнем дерев'яних виробів і споруд. Для цього деревину просочують вогнезахисними препаратами.

У деяких випадках просочування використовують для зміни деяких фізичних властивостей деревини: просочення для глибокого фарбування; підвищення електричного опору або електричної міцності; надання їй гідрофобних властивостей (модифікування деревини).

Процеси гідротермічного оброблення деревини є дуже відповідальними, вимагають складного і дорогого обладнання, правильна експлуатація якого неможлива без спеціальних знань особливостей технологій та кваліфікації обслуговуючого персоналу. Неякісне сушіння деревини або несвоєчасне оброблення антисептиками та антипіренами, призводить до значних втрат

матеріалу під час транспортування, скорочення термінів експлуатації або навіть знищення дерев'яних виробів та значним перевитратам сировини.

Основне завдання дисципліни «Технологія сушіння і захисту деревини» – забезпечити студентів знаннями в області впливу тепла і вологи на деревину, що необхідно для якісного засвоєння курсів «Технологія виробів з деревини», «Технологія деревинно композиційних матеріалів», «Технологія столярних виробів», «Захисне оброблення деревини», а також активної інженерної діяльності, спрямованої на надання деревині відповідних технологічних властивостей; підвищення її формостійкості, міцності, довговічності, підвищення якості виробів та споруд із деревини, збільшення терміну їх експлуатації, а також раціонального використання деревинної сировини. Для вивчення дисципліни студенти мають засвоїти такі дисципліни: «Деревинознавство», «Обладнання галузі».

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

**знати:**

- властивості і параметри агентів гідротермічної обробки(вологого повітря, пари, топкових газів), закономірності зміни їх стану;
- особливості взаємодії води з деревиною та вплив гідротермічної обробки на її фізичні та експлуатаційні властивості;
- способи та основні фізичні закономірності процесів нагрівання, сушіння і просочування деревини, методи їх розрахунку;
- технологію та обладнання виробничих процесів теплової обробки деревинної сировини на деревообробних підприємствах;
- класифікацію та принципові схеми сушильних пристроїв; енергоємність різних варіантів сушильного процесу;
- особливості теплового і циркуляційного обладнання сушильних пристроїв, сучасні конструкції сушарок для пиломатеріалів, шпона, подрібненої деревини;
- технологію та режими процесів сушіння деревини і деревних матеріалів, методи їхнього контролю та регулювання;

- методи та засоби захисту деревини від біологічних та інших ушкоджень, їх порівняльна ефективність та галузі застосування;
- способи, технологію та обладнання просочування деревини біозахисними та вогнезахисними препаратами.

**ВМІТИ:**

- визначати параметри агентів гідротермічної обробки деревини та аналізувати процеси зміни їх стану;
- визначати показники властивостей деревини, що змінюються при її гідротермічній обробці (температура, вологість, щільність, усихання, внутрішні напруження);
- призначати режим і розраховувати термін виробничих процесів теплової обробки, сушіння, просочування;
- користуватися контрольно-вимірювальною апаратурою та регулювати роботу нагрівних, сушильних і просочувальних пристроїв згідно з підібраними режимами;
- оцінювати результати сушіння пилопродукції і визначати показники якості проведення процесу;
- планувати роботу цеху (ділянки) сушіння пилопродукції, визначати та аналізувати продуктивність та інші техніко-економічні показники сушильних та просочувальних пристроїв.

Відомості про авторів:

Розділи 1,2,3 – Пінчевська О.О.

Розділи 3,4,5 – Спірочкін А.К.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	3
<b>1. ВЛАСТИВОСТІ ДЕРЕВИНИ, ЩО МАЮТЬ ВІДНОШЕННЯ ДО ЇЇ ГІДРОТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ</b> .....	9
1.1 Особливості будови деревини.....	9
1.2 Волога у деревині .....	26
1.3 Вимірювання вологості деревини.....	32
1.4 Гігроскопічні властивості деревини.....	35
1.5 Вплив вмісту вологи та термічного оброблення на фізико-механічні властивості деревини.....	42
1.6 Приклади рішення задач .....	51
1.7 Контрольні запитання.....	53
<b>2 ВЛАСТИВОСТІ ОБРОБЛЯЮЧОГО ДЕРЕВИНУ СЕРЕДОВИЩА</b> .....	55
2.1 Властивості водяної пари.....	55
2.2 Властивості атмосферного повітря.....	57
2.3 Діаграми стану повітря.....	60
2.4 Процеси змішування повітря різних станів.....	64
2.5 Приклади рішення задач .....	70
2.6 Контрольні запитання.....	75
<b>3 ТЕПЛОВЕ ОБРОБЛЕННЯ ДЕРЕВИНИ</b> .....	77
3.1 Способи нагрівання деревини.....	77
3.2 Технологія та обладнання теплового оброблення деревини.....	78
3.3 Фізичні закономірності і розрахунок процесів конвекційного нагрівання деревини .....	85
3.4 Розрахунок процесів конвекційного нагрівання замерзлої деревини .....	93
3.5 Розрахунок продуктивності пристроїв для теплового оброблення деревини.....	98
3.6 Приклади рішення задач .....	99
3.7 Контрольні запитання.....	103
<b>4 ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ</b> .....	105
4.1 Способи сушіння деревини.....	105
4.2 Переміщення вологи у деревини.....	106

4.3	Рух вологи у деревині під дією різних градієнтів.....	109
4.4	Механізм процесу сушіння деревини.....	113
4.5	Напруження і деформації у деревині під час сушіння.....	117
4.6	Принципи побудови раціональних режимів сушіння деревини.....	122
4.7	Контрольні запитання.....	124
<b>5.</b>	<b>КОНВЕКЦІЙНІ СУШИЛЬНІ КАМЕРИ ДЛЯ ПИЛОПРОДУКЦІЇ.....</b>	<b>126</b>
5.1	Принципові схеми сушарок.....	126
5.2	Витрати теплоти на сушіння.....	132
5.3	Типи сушильних камер та їх обладнання.....	136
5.4	Конструкції сушильних камер.....	155
5.5	Планування сушильного цеху.....	160
5.6	Контрольні запитання.....	163
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>164</b>
	<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>167</b>

# **1. ВЛАСТИВОСТІ ДЕРЕВИНИ, ЩО МАЮТЬ ВІДНОШЕННЯ ДО ЇЇ ГІДРОТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ**

Деревина – це натуральний композит, який складається з різних хімічних речовин (з різним ступенем поглинання води), які у сукупності утворюють волокна. На відміну від штучних композитів, які можна виготовити з потрібними властивостями, слід враховувати, що дерева, і відповідно деревина, є такими які створені природою.

Сушіння деревини є однією з найбільш витратних за часом та енергією процесів виготовлення виробів з деревини. Анатомічна структура деревини обмежує швидкість пересування та видалення вологи з неї. Крім того, виникаючі сушильні напруження також гальмують швидкість сушіння, адже швидке висихання викликає дефекти, а саме поверхневі та внутрішні тріщини, руйнування і деформування. Мінливість властивостей деревини також ускладнює сушіння. Кожен порода деревини має різні властивості, і навіть у межах однієї породи, спостерігається мінливість у швидкості сушіння та чутливості до виникнення дефектів сушіння, що обмежує розроблення стандартних рекомендацій.

## **1.1. Особливості будови деревини**

Дерево можна розділити на три частини: крона, що складається з гілок та листя, стовбура та коріння. На стовбур припадає близько 80 % загальної маси деревини. Структура деревини, видима неозброєним оком або при невеликому збільшенні, називається макроструктурою, а при великому збільшенні – мікроструктурою.

Макроструктуру деревини можна вивчити, розрізаючи стовбур у трьох напрямках: поздовжньому і поперечному, що поділяється на радіальний та тангенціальний. На рис.1.1 наведено схему розташування поверхонь різних напрямків на зразку деревини.

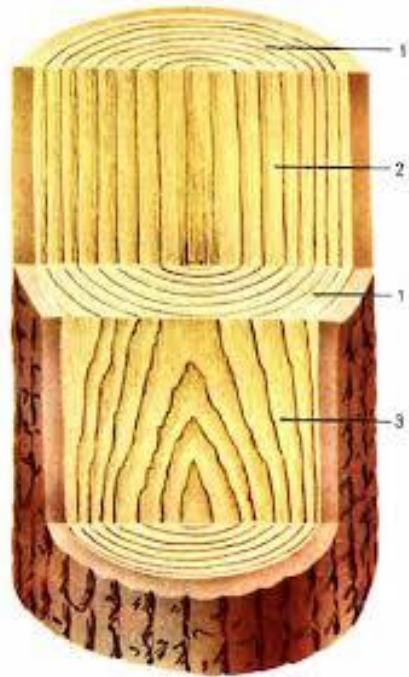


Рисунок 1.1. Основні перерізи стовбура деревини : 1 – поперечний; 2 – радіальний поздовжній; 3– тангенціальний поздовжній

На поперечному перерізі стовбура (рис.1.2 ) видно такі основні частини дерева: кору, місце розташування камбію, заболонь, ядро і корку.

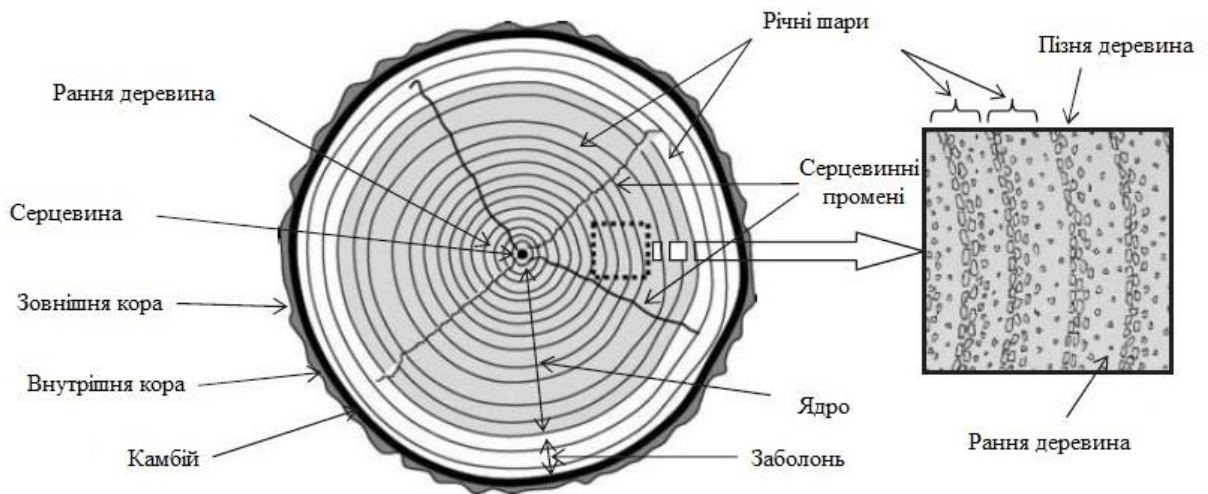


Рисунок 1.2. Ілюстрація основних макроскопічних елементів будови деревини [1]

Кожен із компонентів має певну функцію. Кора захищає деревину від механічних пошкоджень. Її внутрішній шар, званий лубом, передає поживні речовини від крони вниз і зберігає їх. Функція камбію полягає у утворенні

нових клітин як деревини всередині, так і лубу, що призводить до збільшення діаметру дерева. Цей процес ілюструє наявність концентричних кіл, які називаються річними шарами, що складаються з пізньої (темної) та ранньої (світлої) зон. Заболонь допомагає в життєвому процесі дерева шляхом накопичення поживних речовин та проведення вологи від коріння до крони. Деревина внутрішньої частини деревини надає міцного опору дереву. З ростом дерева, клітини у його внутрішній частині стовбура поступово стають неактивними і неживими, але не гниють. Ця центральна частина стовбура називається ядрою (спілою) деревиною.

Ядроутворення – це позитивний біологічний процес деревних рослин, який консервує внутрішні відмерлі шари деревини, підвищуючи їх стійкість. Породи, у яких цей процес супроводжується різким потемнінням та зменшенням вмісту вологи центральної зони називаються ядровими. До них належать сосна, кедр, модрина, тис, яліщець, дуб, ясен, ільм, горіх, верба, тополя тощо [2].

У інших порід відмирання центральної частини деревини не супроводжується потемнінням, такі породи називається неядрові. Серед цієї групи є такі, у яких середня частина у ростучому дереві має меншу вологість ніж периферійні зони і її називають спілою деревиною, а породи цієї групи - спілодеревними: ялина, ялиця, бук, осика, граб тощо. Якщо вологість центральних та периферійних зон однакова і колір деревина має незмінний, то такі породи називають заболонними: береза, вільха, клен, липа тощо.

У неядрових порід трапляється забарвлення центральної зони у темні відтінки, що нагадує ядрову деревину, але на відмінну від останньої, де ядро має форму кола і займає певну кількість річних шарів. Таке темне забарвлення може мати різну конфігурацію (лопатеву, зіркоподібну). Це несправжнє ядро, – рис.1.3. Найчастіше воно утворюється у бука, берези, клена, явору, груші тощо. Процес утворення несправжнього ядра пов'язаний з віковою диференціацією тканин [2].



а

б

Рисунок 1.3. Різні види несправжнього ядра: а- кругле; б –лопатеве [3]

Розміри ядра і заболоні мають важливе практичне значення. У порід з вузькою заболонню (наприклад, біла акація має заболонь завширшки 1-10 мм) пиломатеріали виготовляються тільки з ядра, а заболонь буде у відходах. У сосни, ясеня заболонь складає  $1/3$  радіуса і заготовки матимуть ядрову і заболонну зони, що надає їм неоднакових фізичних властивостей та складності в сушінні [2].

У центрі поперечного перерізу стовбура знаходиться серцевина – невелика ділянка, утворена пухкими тканинами, що складаються з тонкостінних, вільно з'єднаних клітин. У зрубаному дереві вона легко обсипається і гниє. Новоутворена в перші роки зростання деревина, розташована біля серцевини стовбура і гілок розташована ювенільна деревини – утворена у перші роки зростання дерева, яка володіє фізико-механічними властивостями, що відрізняються від властивостей деревини, яка утворилася пізніше.

У напрямку поперечного перерізу поживні речовини проходять від лубу до центру через групи клітин, що йдуть під прямим кутом до шарів камбію і називаються серцевинними променями. У деяких листяних порід (дуб, бук) на поперечному перерізі видно світлі блискучі стрічки, що радіально спрямовані від серцевини до кори – це серцевинні промені (рис.1.4). Вони підрозділяються на первинні, які є продовженням серцевини і починаються від неї та вторинні, що починаються на різній відстані від

серцевини, доходять до кори і продовжуються в ній. В ростучому дереві серцевинні промені проводять воду і поживні речовини поперек стовбура, а також накопичують споживні речовини [2].

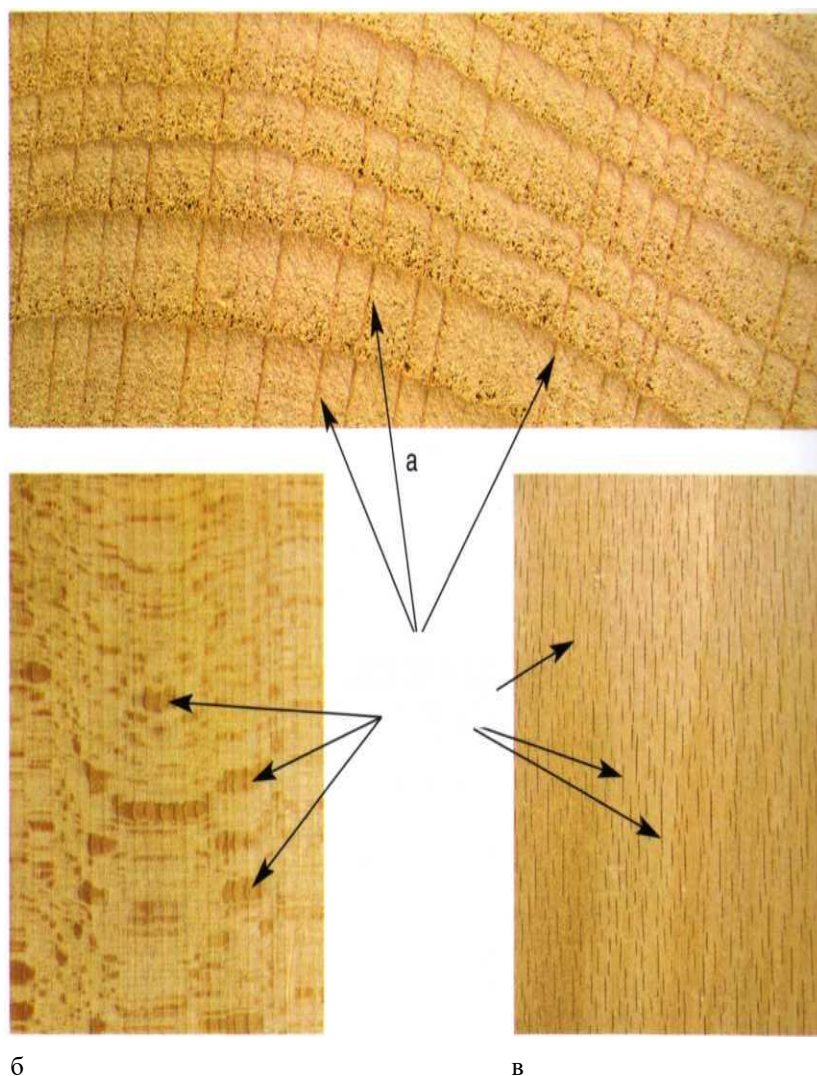


Рисунок 1.4. Серцевинні промені бука: а – на поперечному; б – на радіальному; в – на тангенціальному перерізах [3]

На поперечному перерізі листяних порід видні отвори, що є перетинами судин – водопровідних капілярів (рис.1.5). Судини розташовані суцільним кільцем в ранній зоні річного шару у кільцесудинних порід ( дуб, ясень, в'яз, ільм, каштан тощо) та рівномірно по всьому шару у розсіяносудинних порід ( горіх грецький, береза, осика, бук, липа, граб, клен, вільха тощо). У порожнинах деяких пор видно, що вони закупорені тилами, які уповільнюють процес сушіння.

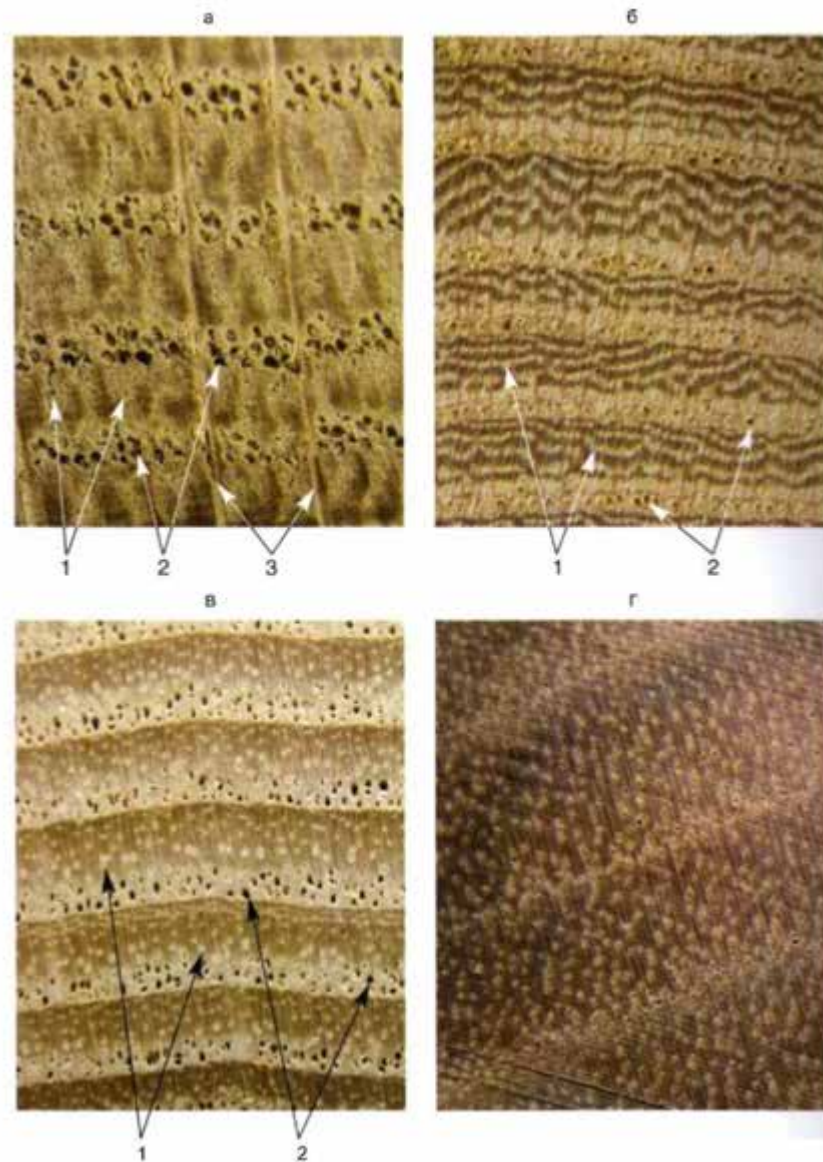


Рисунок 1.5. Схеми розташування судин в деревині листяних порід: а,б,в – кільцесудинні породи з радіальним, тангенціальним та розсіяним розташуванням судин; г – розсіяносудинна порода; 1 – дрібні судини в пізній зоні; 2 – великі судини в ранній зоні; 3 – широкі серцевинні [3]

У берези, вільхи, липи, груші, клена тощо в нижній частині стовбура зустрічаються серцевинні повторення у вигляді бурих або коричневих прямих та хвилястих вузьких стрічок або замкнених контурів, що нагадують серцевину (рис.1.6). Раніше вважали, що ці утворення виникають в результаті пошкодження камбію комахами. Можливо вони є аномаліями формування деревини [3].

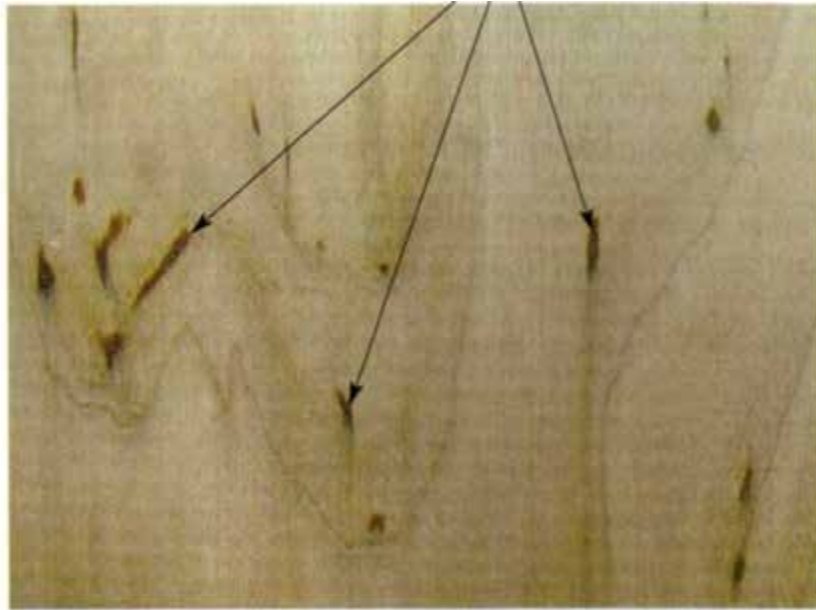


Рисунок 1.6. Серцевинні повторення у берези [3]

У деяких хвойних порід (сосна, модрина, кедр, ялина, смерека) присутні наповнені смолою канали, що пронизують деревину. Це смоляні ходи (рис.1.7), які бувають вертикальними (вони помітні на поперечному перерізі в пізній зоні деревини у вигляді світлих точок) та горизонтальними, які можна побачити тільки під мікроскопом [3].

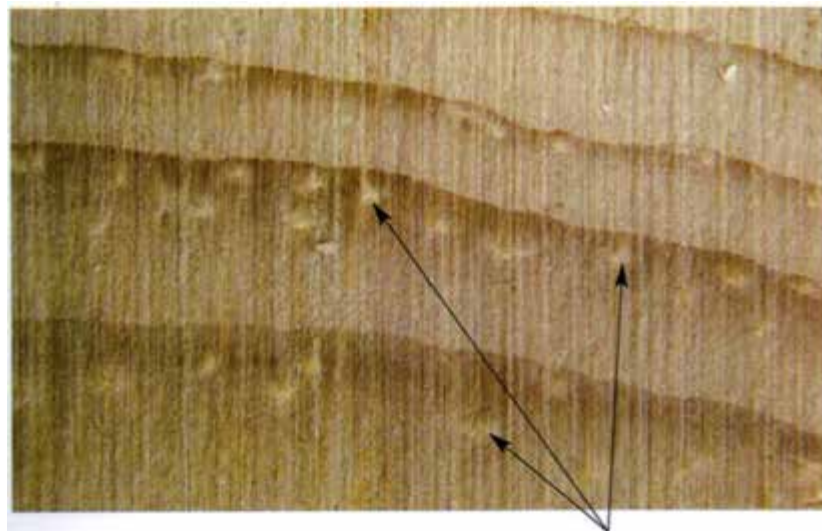


Рисунок 1.7. Вертикальні смоляні ходи в деревині кедра [3]

Деревина як природний матеріал дуже різноманітна за своєю структурою і має багато природних вад, що виникають як протягом періоду зростання, так і протягом оброблення. Часто такі вади можуть спричинити

проблеми із сушінням деревин, що призводить до зменшення її міцності та утворенням дефектів внаслідок оброблення. Загальна кількість вад деревини дуже велика [4] . Значний вплив на досягнення якісного сушіння мають такі вади як сучки, нахил волокон, їх завилькуватість та завиток, реактивна деревина.

Сучки – це частини гілок, огорожених деревиною, які зазвичай беруть початок у центрі стовбуру. Вплив сучків залежить від їх розміру, форми, частоти і розташування у пилопродукції (рис.1.8). Наявність сучків у круглому лісі значно менше впливає на його міцнісні властивості ніж у пиляній деревині. Коли розпилюють колоду, сучки та волокна, що їх оточують, перестають бути безперервними. Це негативно впливає на міцнісні властивості пиломатеріалів і ускладнює процес сушіння. Перерізані волокна навколо сучків у пиломатеріалах викликають їх розрив, концентрацію або нерівномірний розподіл напружень.

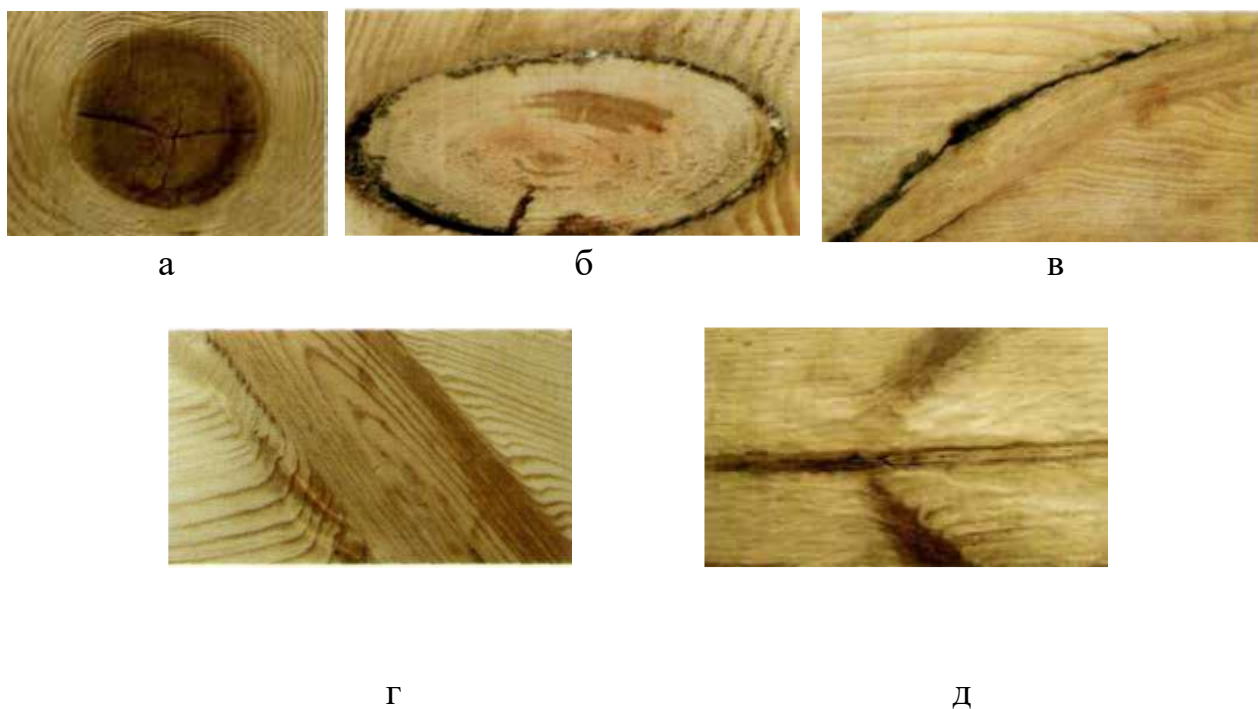


Рисунок 1.8. Сучки у пиломатеріалах: а – круглі, б – овальні, в – поздовжні, г– зшивні, д – розгалужені [3]

Нахил волокон – це відхилення волокон від поздовжньої вісі сортименту. Розрізняють два їх різновиди – тангенціальний та радіальний.

Тангенціальний нахил характеризується спіральним розташуванням волокон. У круглих обкорованих сортиментах його видно по гвинтових тріщинах на бічних поверхнях (рис.1.9 а), а у необкорованих – по напрямку борозни кори. У пилопродукції тангенціальний нахил волокон можна побачити по відхиленню смоляних ходів, судин, серцевинних промені, тріщин від поздовжньої вісі сортименту. Радіальний нахил волокон виникає у разі розкрюювання занадто збіжних, окоренкуватих та кривих колод – рис.1.9 б. Якщо розрізи пилки проходять паралельно поздовжній вісі колоди, то річні шари і, відповідно, волокна на радіальній поверхні пиломатеріалу будуть розташовні під кутом до крайки.

Завилькуватість – звивисте або безладне розташування волокон деревини, яке частіше зустрічається у листяних порід. Хвиляста завилькуватість має більш або менш упорядковане хвилеподібне розташування вигнутих волокон, що утворює характерну струменеву текстуру – рис.1.10 а. Плутана завилькуватість (рис.1.10 б) характеризується безладним розташуванням волокон і зустрічається у деревині наростів (капів). Завиток – це місцеве викривлення річних шарів біля сучків (рис.1.10 в).



а



б

Рисунок 1.9. Нахил волокон: а – тангенціальний у колоді; б – радіальний у пилопродукції [3]



а

б

в

Рисунок 1.10. Завилькуватість: а – хвиляста ( у ясена); б – плутана ( у берези) та завиток – в [3]

Вищенаведене неупорядковане розташування волокон знижує міцність деревини і ускладнюють її механічне оброблення, збільшують всихання і можуть викликати жолоблення пиломатеріалів. Разом з тим завилькуватість, особливо плутана, утворює красиву текстуру. Яка цінується у разі використання деревини як декоративного матеріалу.

Реакційна деревина відноситься до аномальних деревних тканин, що утворюється у стовбурах дерев, підданих сильному тиску вітру. Існує два типи реакційної деревини: у хвойних порід – це компресійна деревина, а у листяних порід – тягова. Компресійна деревина утворюється на нижній стороні гілок похилих хвойних порід і містить більше лігніну ніж звичайна деревина (рис.1.11). Тягова деревина утворюється на верхньому боці нахилених листяних порід та містить більше целюлози, ніж звичайна деревина.



Рисунок 1.11. Компресійна деревина ( затемнена ділянка ) [1]

Реакційна деревина набагато щільніше звичайної деревини: на 35% щільність компресійної деревини більше і на 7% щільність тягової деревини більше ніж звичайної. Поздовжнє усихання також більше в 10 разів для компресійної деревини і 5 разів для тягової. Пиломатеріали, що містять компресійну деревину, можуть піддаватися надмірним викривленням під час сушіння і, як правило, руйнуються.

Приблизно 90% клітин у дереві розташовані уздовж стовбуру. Ці клітини називають волокнами або макрокапілярами. Схематично їх можна уявити як купу порожнистих соломин, які мають міцні стінки. Вид, розміри та особливості розташування цих соломин-макрокапілярів у хвойних та листяних порід суттєво розрізняються [5], а будова клітинної стінки схожа.

Під час вегетації у клітині камбію з'являється серединна пластинка, яка розростаючись ділить материнську клітину на дві дочірні. Ця пластинка складається з пектинових сполук – аморфних, гідрофільних та дуже пластичних. Потім по обидва боки пластинки відкладаються первинні оболонки, що обмежують протопласт кожної дочірньої клітини. Структура та хімічний склад клітинної оболонки протягом життя різко змінюються.

Первинні оболонки складаються з груп паралельно розташованих нитчастих молекул целюлози (вуглеводного полімеру з дуже довгою ланцюговою молекулою) – фібрил. Матрикс оболонки на початку формування складається з пектинових сполук та геміцелюлоз (речовин близьких до целюлози, але маючих меншу довжину молекули).

Після закінчення росту клітини починає утворюватися вторинна оболонка, яка спочатку складається з целюлози та геміцелюлоз. На внутрішню поверхню клітинної стінки шарами відкладаються целюлозні мікрофібрили, які у зрілій клітині виконують механічну функцію.

Зміцнення клітини завершується шляхом просочування її лігніном (складний неуглеводний полімер), який надає стінкам жорсткості, спроможності опиратися навантаженням. Лігніфікація відбувається у період

утворення вторинної оболонки. Спочатку дерев'яні первинна оболонка, далі міжклітинний шар і, нарешті, вторинна оболонка.

Первинна оболонка містить порівняно мало целюлози, але по мірі зростання вона збагачується лігніном, що призводить до підвищення міцності. Первинні оболонки двох сусідніх клітин і міжклітинна речовина зливаються в одну структуру, яку називають складною серединною пластинкою. Оболонку зрілої клітини у називають клітинною стінкою.

Схема будови клітинної стінки наведена на рис.1.12.

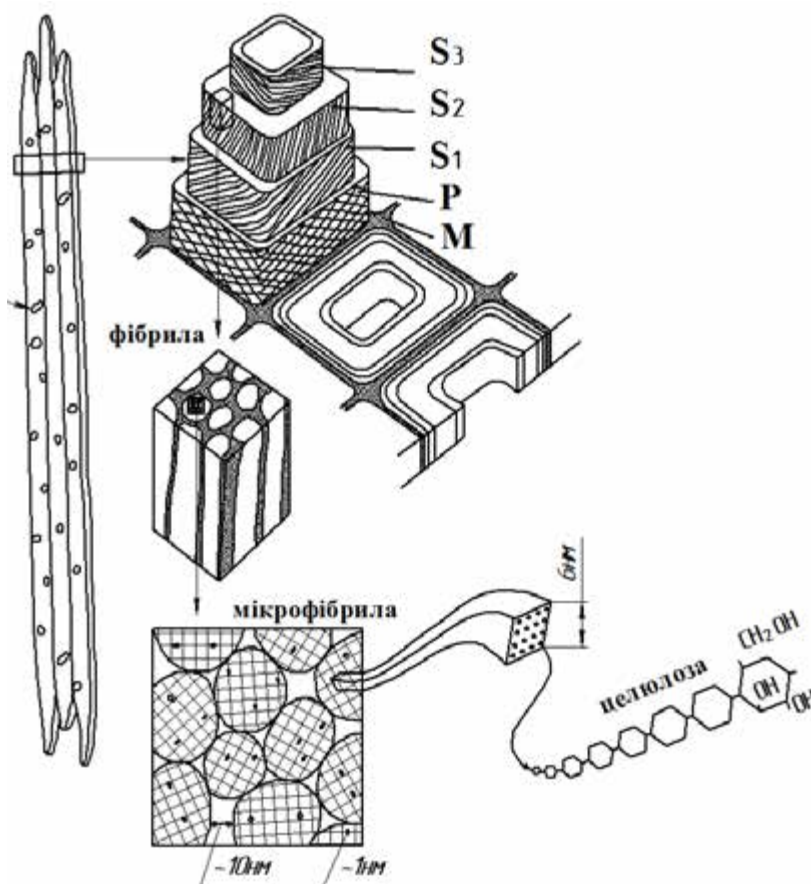


Рисунок 1.12. Схема будови клітинної стінки трахеїди хвойних порід [6]

На кожному "східці" просторової моделі частина, що передуює даному шару віддалена. Тонкими лініями показано розташування мікрофібрил – які є структурними елементами фібрил, і складаються з міцел, утворених групуванням молекул целюлози. Середина пластинка – М складається на 60-90% з лігніну, має товщину 0,5-1,5 мкм. Крім того, до її складу входять геміцелюлоза, пектини і незначна кількість кремнію.

Первинна оболонка – Р має також малу товщину (в сирому стані 0,1-0,5 мкм, а у сухому у 3 рази меншу). Мікрофібрили в ній розташовані не упорядковано, між ними знаходиться лігнін.

Вторинна оболонка – S у 10 разів є товстішою за первинну; має спіралеподібне розташування мікрофібрил під різними кутами до поздовжньої вісі клітини. У тонкому зовнішньому шарі  $S_1$  (товщиною як шар Р) мікрофібрили перехрещуються спіралью під кутом до вісі клітини (у хвойних порід цей кут складає  $60^\circ$ , у листяних  $45^\circ$ , а у модрина – майже  $90^\circ$ ).

У широкому середньому шарі  $S_2$ , мікрофібрили розташовані у вигляді право спрямованих Z-подібних спіралей з невеликим кутом нахилу від  $5^\circ$  до  $30^\circ$ .

Внутрішній шар  $S_3$  товщиною 0,1...0,2 мкм має мікрофібрили, що розміщені під пологим кутом  $50^\circ - 90^\circ$ . Матрікс її включає у себе ті ж самі речовини, що і шар Р, але вміст лігніну тут зменшується, а целюлози та гемізюлоз збільшується. У поперечному перетині клітинної стінки частка лігніну зменшується від шару М до шару  $S_3$ .

У клітинній стінці є капіляри розміром 30-40 нм, які в ростучому дереві заповнюються водою. В абсолютно сухих клітинних стінках капіляри практично відсутні.

Вторинна оболонка має заглиблення – прості і обведені пори (рис.1.13). Пора формується між двома сусідніми клітинами, у яких міжклітинна речовина і первинні оболонки утворюють мембрану, а вторинні оболонки розчиняються у вигляді отворів. Якщо вторинна оболонка утворює дашок по периметру пори, то така пора називається обрамленою. Вони є характерними для хвойної деревини.

Пори, які мають вигляд кільцевого отвору без обрамлення називають простими. Вони більш поширені у листяних породах. Зустрічаються ще напівобрамлені пори, які мають обрамлення тільки збоку однієї з двох сусідніх клітин. У центрі мембрани обрамленої пори є потовщення різноманітної

форми, яке називають торусом. Закриваючи отвори пор, торуси можуть регулювати хід водних розчинів між клітинами.

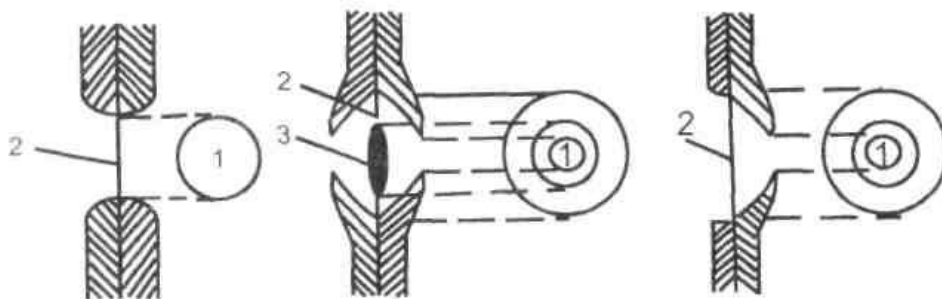
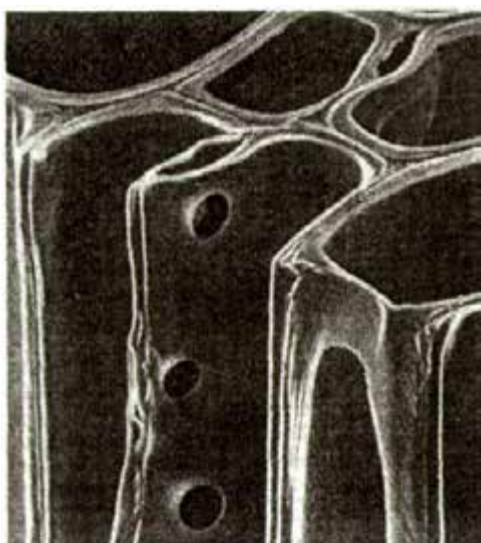
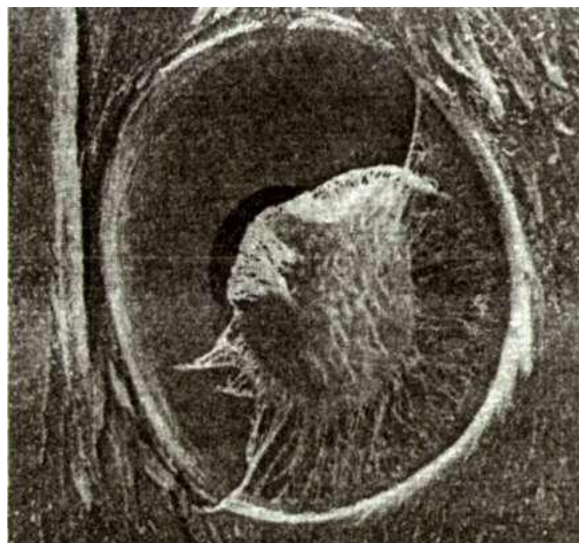


Рисунок 1.13. Типи пор у клітинних стінках: а – проста; б – обрамлена; в – напівобрамлена; 1– отвори пор; 2 – мембрана; 3 – торус [2]

На рис.1.14 наведені розрізи обрамлених пор, з видаленими повністю (рис.1.14 а) або частково (рис.1.14 б) мембранами, розташованих у стінках трахеїд.



а



б

Рисунок 1.14. Розрізи обрамлених пор: а –розташування пор в трахеїдах; б – частково видалена мембрана з торусом обрамленої пори [5]

Пори відіграють важливу роль у прискоренні видалення вологи з деревини під час сушіння і, навпаки, наявність мембрани та торусу ускладнюють просочення деревини різними розчинами під час консервування.

Будова деревини хвойних та листяних порід суттєво відрізняється. Так, деревина сосни (рис.1.15) типового представника хвойних порід складається з двох взаємно проникаючих систем клітин, що розташовані уздовж та поперек стовбура. 90% клітин хвойних порід складають трахеїди – сильно витягнуті волокна зі здерев'янілими стінками та косо зрізаними кінцівками. Вони зібрані у ряди, причому в кожному ряду трахеїди з великими порожнинами та тонкими стінками межують з товстостінними трахеїдами, які мають малі порожнини (рис.1.16). Перші виконують провідну функцію – транспортують вологу і називаються ранніми трахеїдами, оскільки утворилися на початку вегетаційного періоду.

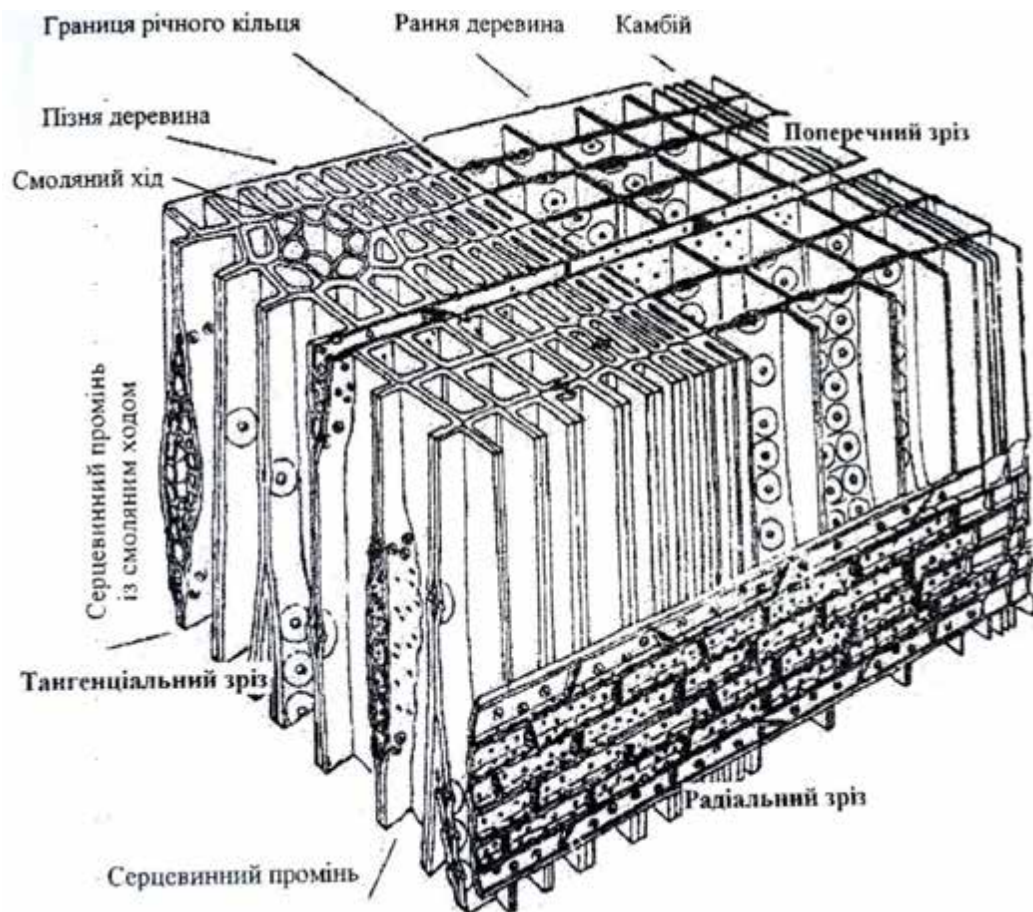


Рисунок 1.15. Схема мікроскопічної будови деревини сосни [7]

Другі, що утворилися наприкінці вегетаційного періоду – виконують механічну функцію і називаються пізніми.

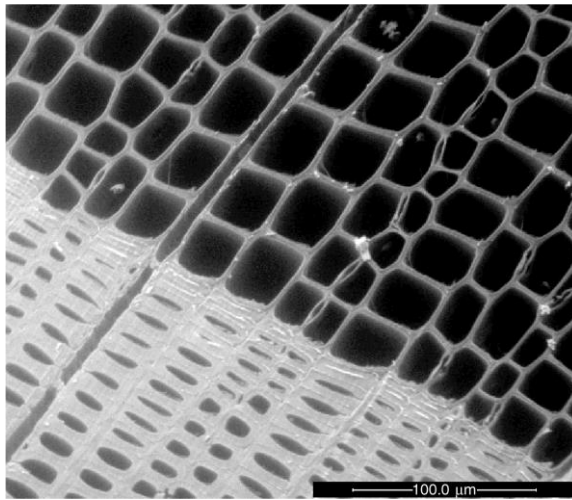
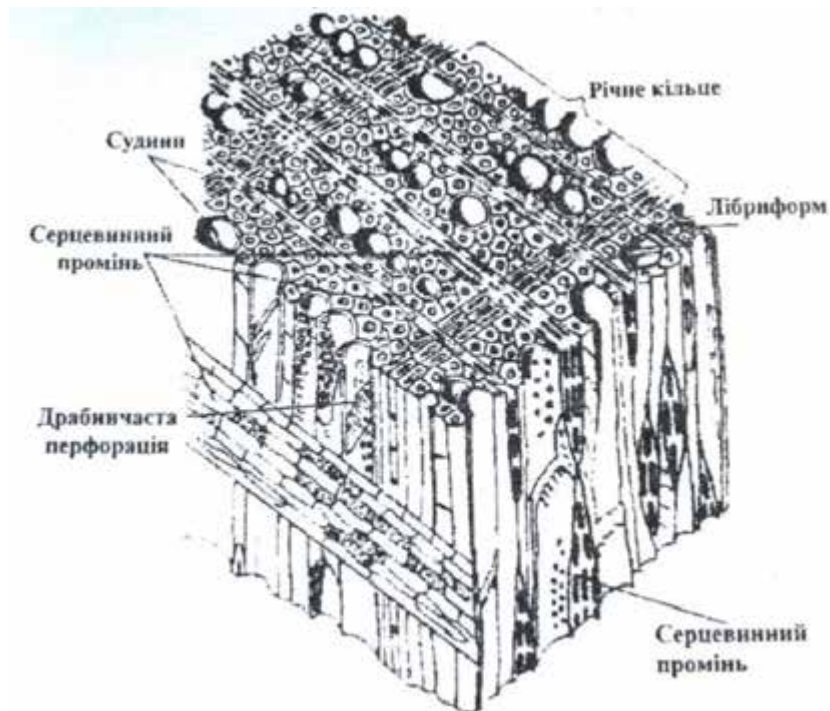
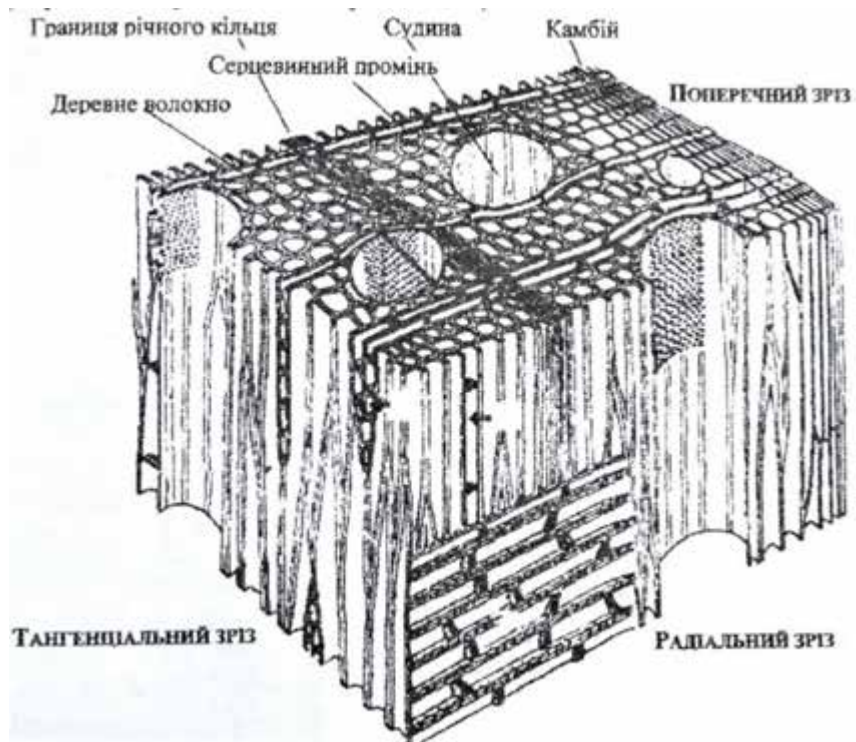


Рисунок 1.16. Поперечний перетин трахеїд ранньої та пізньої зон деревини [8]

Деревина листяних порід має більшу різноманітність анатомічних елементів. Крім того, за макробудовою вона поділяється на розсіяносудинну та кільцесудинну. На рис.1.17 наведено схеми типових представників розсіяно судинних порід – берези (рис.1.17 а) та кільцесудинних порід – дубу (рис.1.17 б). Провідну функцію тут виконують переважно судини, а механічну – волокна лібриформу (або деревні волокна).



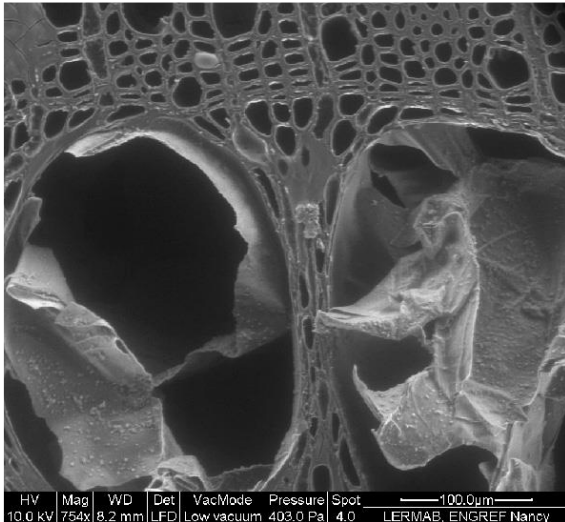
а



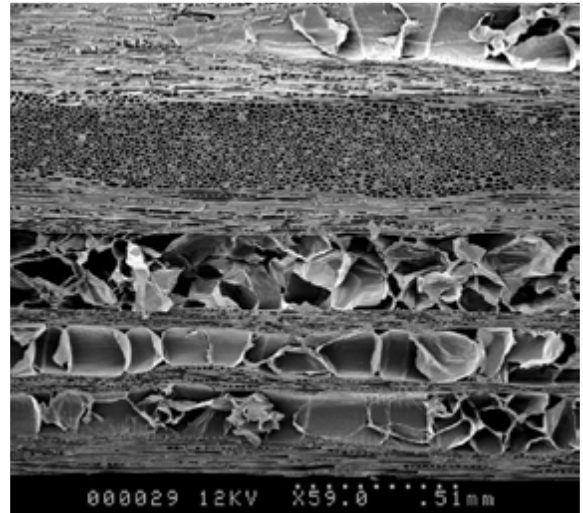
б

Рисунок 1.17. Схема мікроскопічної будови листяних порід деревини; а – берези, б – дубу [7]

Судини займають більшу частину обсягу стовбура. Вони являють собою довгі косо зрізані на кінцях вертикальні трубки, що складаються з окремих коротких клітин – члеників з широкими порожнинами і тонкими стінками. Стінки члеників з часом повністю або частково руйнуються, утворюючи круглі отвори (проста перфорація) або щілиноподібні отвори (драбинчаста перфорація). Така структура підсилює міцність судин. Між собою судини сполучаються за допомогою обрамлених пор, у яких на відміну від хвойних порід відсутні торуси. Завдяки такій будові утворюється єдина просторово розгалужена водопровідна система. З неї виключаються судини, які закупорені тилами – певними виростами, що проникають через обрамлені пори. Розміри судин, члеників, пор різняться залежно від породи деревини (рис.1.18). Наявність тил також спостерігається не у всіх порід, для вітчизняних порід вони присутні у дубі, ясені, горіху грецького, акації.



а



б

Рисунок 1.18. Тили у деревині дубу: а – поперечний переріз, б – поздовжній переріз [8]

Меншу частину стовбура займають волокна лібриформу (деревне волокно), що виконують механічну функцію. Вони являють собою витягнуті клітини із загостреними кінцівками, вузькими порожнинами та товстими стінками, у яких розташовані прості щілиноподібні пори. На поперечному перерізі волокна лібриформу схожі на п'ятикутники, які щільно прилягають один до одного. У більшості порід на зовнішній межі річного кільця розташована смужка з двох-трьох рядів цих волокон, завдяки якій річні шари добре розрізняються.

Отже складність деревини як матеріалу, що характеризується її будовою обумовлює відповідні підходи для розробки раціональних режимів її гідротермічного оброблення.

## 1.2. Волога у деревині

В ростучому дереві деревина має значну кількість води, що необхідна для його діяльності. Розподіл вологи по стовбуру досить нерівномірний, у хвойних порід більш вологою є заболонна частина, а у листяних – як ядрова (центральна), так і заболонна – табл.1.1.

Таблиця 1.1. Середня вологість свіжозрубаної деревини деяких порід [9]

Група	Вологість ,%	Деревина ядра або центральної частини спілодеревних порід	Деревина заболоні та спіла
I	30 – 40	Ялина, сосна, модрина, ялиця, дугласія	-
II	40 – 60	Ясен, акація, горіх	-
III	80 – 100	Дуб, липа	Бук, береза, клен
IV	100 – 200	Тополя, верба, в'яз	Хвойні з групи I, вільха, каштан

У зрубаній деревині залежно від умов зберігання кількість води може збільшуватися або зменшуватися. Так, зберігання необкорованих букових кряжів довжиною 4 м на верхньому складі протягом півроку ( з березня по жовтень) сприяло значному зменшенню вмісту вологи – рис.1.19.

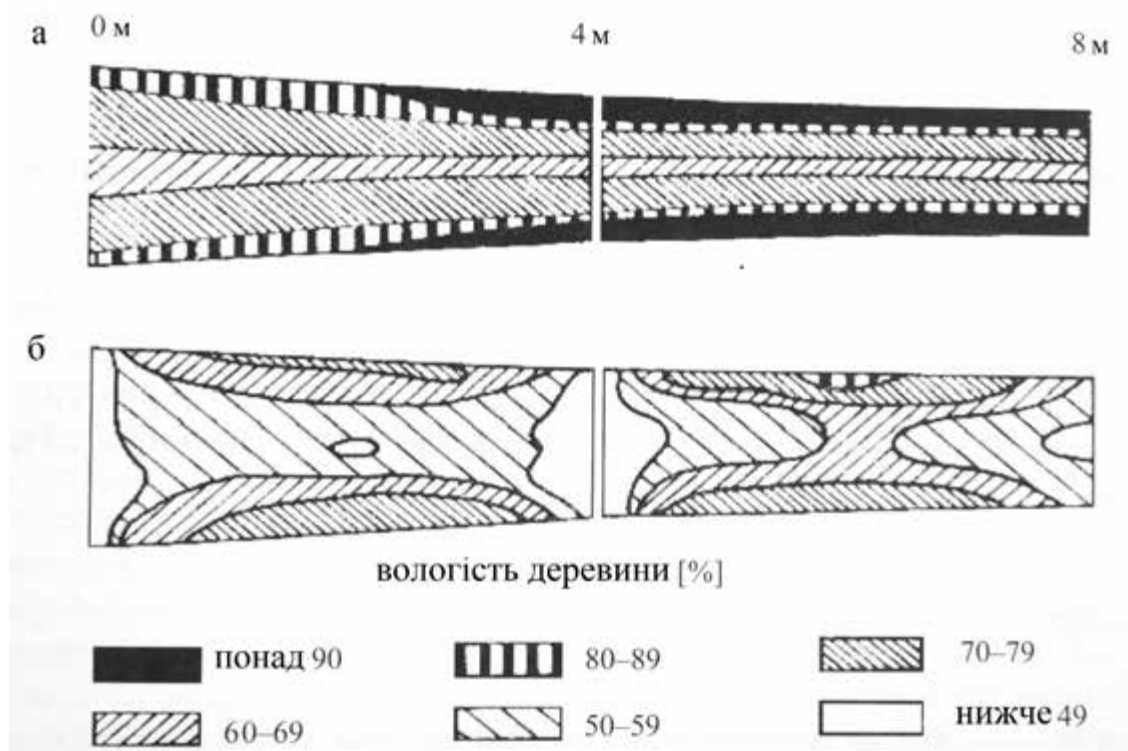


Рисунок 1.19. Розподіл вологості колоди з деревини бука: а – у свіжозрубаному стані; б – після зберігання на складі [9]

Порівняння вологості центральної частини та заболоні свідчить, що вміст вологи в колодах не є рівномірним; як наслідок, вологість дошок, випиляних з колод теж є неоднорідною. Крім того, різні колоди, навіть від однієї породи, можуть мати різний розподіл вмісту вологи, особливо якщо вони були зрубані в різних регіонах або у різний час. Отже, неможливо сподіватися на те, що пиломатеріали будуть мав однакове значення вологості.

Одним із способів описати розподіл вологи в пакеті пиломатеріалів було б розрахувати середнє значення вологості кожної дошки. плит у пачці. Проте, це не є ані практичним, ані необхідним, оскільки відомо, що дошки із центральної частини стовбура, ймовірно, будуть відрізнятися від дошок заболоні. Зазвичай, вологих дошок буде більше, ніж сухіших за значення середньої вологості дошок у пакеті. Значна кількість дошок матиме вміст вологи, близький до середнього, але деякі, ймовірно, будуть відрізнятися більше, ніж можна було очікувати. Вміст вологи окремих дошок буде відрізнятися більше для пакетів, що складаються з пиломатеріалів, виготовлених з декількох колод. Проведені Connors [10] дослідження розподілу початкової вологості пилопродукції з гікорі показали, що він підпорядковується нормальному закону – рис.1.20.

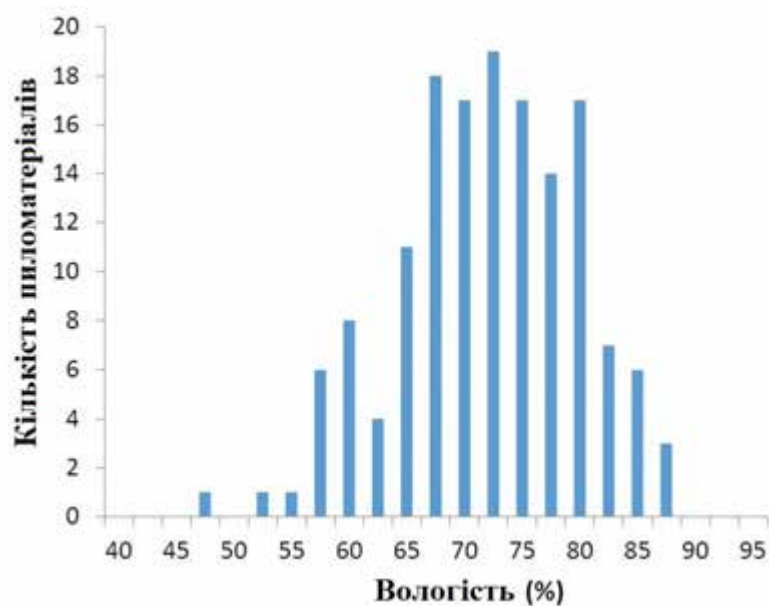


Рисунок 1.20. Розподіл початкової вологості 150 дошок з деревини гікорі із середньою вологістю 70% [10]

Все це ускладнює процес сушіння пилопродукції, а завданням технолога є не лише зменшення вмісту води дошок, але й мінливості її вмісту. Коли завершується сушіння, вміст води у кожній дошці повинен знаходитись у межах  $\pm 1\%$  від середнього значення заданої кінцевої вологості дошок у пакеті. На рис. 1.21 наведено бажаний розподіл кінцевої вологості пиломатеріалів від середньої вологості 7%. Зрозуміло, що більшість дошок матимуть вологість у діапазоні 6% – 8%.

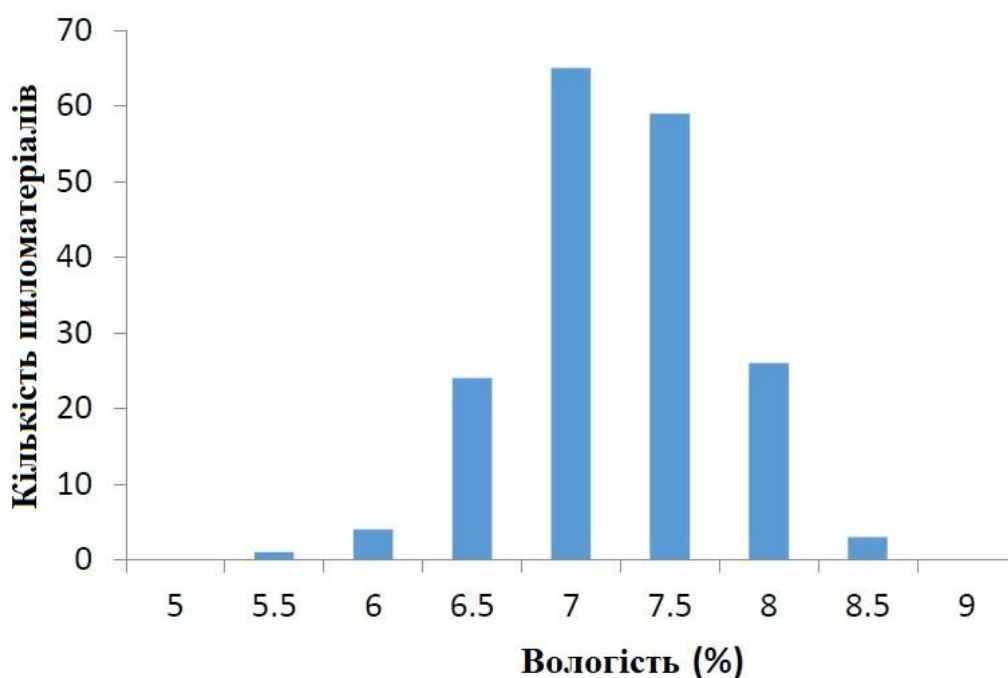


Рисунок 1.21. Бажаний розподіл кінцевої вологості пилопродукції [10]

Такий розподіл вологості є бажаним для висушених пиломатеріалів за першою категорією якості, призначених для виготовлення особливо важливих виробів, як-то музичні інструменти, спортивний інвентар, моделі тощо.

У свіжозрубаній деревині розрізняють, тобто мокрій, розрізняють три види води: вільну, що заповнює порожнини клітин; зв'язану, що заповнює субмікроскопічні простори у стінках клітин, і хімічно зв'язану, що входить до складу хімічних зв'язків між структурними органічними сполуками, вона утримується найпотужніше і, навіть, час нагрівання тіла до 120-150 °C не видаляється. Лише перші два види води (рис.1.22) можна видалити під час сушіння.

Вільна волога називається «вільною», тому що її властивості дуже близькі до властивостей води, а саме щільність, в'язкість, тиск насиченої пари тощо. Вона утримується у деревині силами капілярної взаємодії. Заболонь та рання деревина містять більше вільної вологи. Видалення її не викликає зміни розмірів деревини; енергія, що необхідна для її видалення є значно меншою, ніж для видалення зв'язаної води. Проте занадто швидке видалення вільної води може призвести до колапсу клітин. Кількість вільної вологи залежить від об'єму порожнин клітин і коливається для різних порід деревини від 60% – 70% до 200% – 250 % по відношенню до маси сухої речовини.

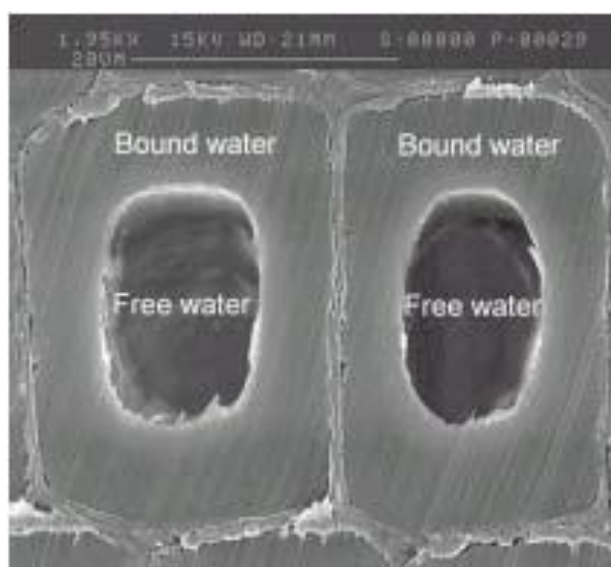


Рисунок 1.22. Мікроріз клітин деревини з ілюстрацією локації вільної (free water) та зв'язаної (bound water) вологи [1]

Максимальна кількість зв'язаної води в клітинних стінках відповідає межі їх насичення, залежить від породи деревини і може коливатися від 22 до 53%. Прийнято вважати, що середнє значення вологості межі насичення становить  $W_{\text{MH}}=30\%$ .

Зв'язана вода поділяється на адсорбційну та мікрокапілярну. Адсорбційна вода знаходиться всередині деревинної речовини. Вона схожа за своїми властивостями на тверде тіло, не розчинює звичайні для води речовини, не електропровідна, за діалектичною проникливістю близька до деревини, а за теплоємністю - до льоду; її мономолекулярні шари у деревині не замерзають.

Кількість адсорбційної води становить близько 4% і її видалення є особливо складним, тому для технолога деревообробки вона є недоступною, оскільки залишається і в абсолютно сухому стані.

Для випаровування вологи з деревини необхідно витратити певну кількість енергії. За Skaar та Simpson [11] свіжозрубана деревина зі значною кількістю вільної вологи вимагає для її випаровування 2,4 МДж/кг теплової енергії (рис.1.23). Зв'язана волога потребує майже у 1,5 рази більшої кількості енергії для видалення, причому чим менше її вміст у деревині, тим більше необхідно витратити енергії.

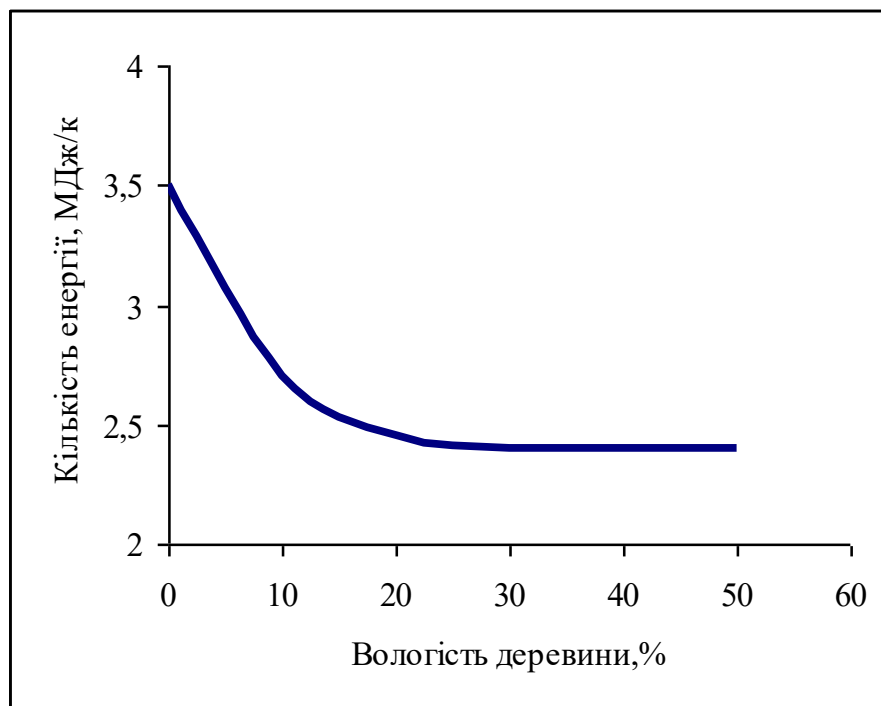


Рисунок 1.23. Ілюстрація зміни кількості енергії для видалення вологи з деревини [11]

Враховуючи, що деревина має велику кількість клітин заповнених вологою, причому кількість вільної води у ній більше, тому кількість енергії, необхідної для видалення вологи з деревини змінюється і у середньому становить 2,6 МДж/кг.

Складнощі видалення вологи з деревини пов'язані також із характером її зв'язку з деревною речовиною. Це можна прослідкувати також і за запропонованою Ребіндером П.О. [12] класифікацією вологих тіл – табл.1.2.

Таблиця 1.2. Класифікація вологих матеріалів

Вид	Характеристика виду	Представники
Колоїдні тіла (еластичні гелі)	У разі зміни вмісту вологи помітно змінюють свої розміри, але зберігають властивість еластичності. За характером набрякання у рідкому середовищі поділяються на такі, що набрякають необмежено (здатні переходити у колоїдний розчин), та на такі, що набрякають обмежено.	Желатин
Капілярно-пористі тіла (крихкі гелі)	Під час зміни вмісту вологи мало змінюють свої розміри, але стають крихкими при висиханні	Керамічні матеріали, деревне вугілля
Капілярно-пористі колоїдні тіла	Мають капілярно-пористу будову, а стінки їхніх капілярів мають властивості гелів, що обмежено набрякають	Шкіра, тканини, торф, деревина

Видно, що серед різновидів вологих тіл деревина відноситься до комплексного виду, що увібрав у себе специфічні особливості перших двох, крім того, складнощі її будови посилюють складнощі сушіння.

### 1.3. Вимірювання вологості деревини

Вміст вологи у деревини – це одна з найістотніших характеристик цього матеріалу. Кількість вологи впливає на масу деревини, її розміри, стійкість до пошкодження грибами і комахами, фізичні та механічні властивості. Обчислювати вміст вологи можна двома способами:

- Відношенням маси води до маси абсолютно сухої деревини, що використовується для визначення вологості пилопродукції, напівфабрикатів, виробів з деревини. Прийнято називати таку вологість деревини,  $W_a, \%$ , абсолютною:

$$W_a = \frac{m_{H_2O}}{m_0} = \frac{m_B - m_0}{m_0} 100\% , \quad (1.1)$$

де  $m_g$  – маса вологого зразка деревини, г;

$m_0$  – маса зразка деревини у абсолютно сухому стані, г.

Іноді для розрахунків зручніше обчислювати вміст вологи не у відсотках, а у безрозмірних одиницях:

$$u = \frac{W_a}{100} , \quad (1.2)$$

яке називають вологовмістом деревини.

- Відношенням маси води до маси вологої деревини, що використовується для визначення вологості палива та у хімічній переробці деревини. Таку вологість прийнято називати відносною:

$$W_{\text{від}} = \frac{m_{H_2O}}{m_B} = \frac{m_B - m_0}{m_B} 100\% . \quad (1.3)$$

Між цими величинами є певна залежність. Маючи значення абсолютної вологості деревини можна підрахувати її відносну вологість:

$$W_{\text{від}} = \frac{W_a}{(1+W_a)} , \quad (1.4)$$

і навпаки, за відомими значеннями відносної вологості деревини можна підрахувати її абсолютну вологість:

$$W_a = \frac{W_{\text{від}}}{(1-W_{\text{від}})} \quad (1.5)$$

Існує кілька методів вимірювання вологості деревини. Порівняльна характеристика їх наведена у табл.1.3. Два з них – гідрометричний і колориметричний сьогодні мають лише історичне значення, оскільки були усунуті електричними методами.

Таблиця 1.3. Порівняння методів вимірювання вологості деревини [10]

Назва способу	Опис та необхідне обладнання	Переваги	Недоліки
Ваговий (ДСТУ 4922:2008 [13] )	Застосовують терези та сушильну шафу типу СНОЛ. Вимірюють масу зразка деревини у вологому стані і після висушування за температури $103 \pm 2$ °С до абсолютно сухого стану	Виміри є точними у будь-якому діапазоні вологості деревини	Потребує значного часу висушування і не придатний до просоченої та вживаної деревини

Продовження таблиці 1.3

Назва способу	Опис та необхідне обладнання	Переваги	Недоліки
Дистиляційний	Застосовують дистилятор, терези та подрібнювач деревини. Подрібнену деревину після розміщення у колбі з розчинником (толуолом) піддають процесу дистиляції протягом чотирьох годин. По кількості дистиляту вираховують вологість деревини	Виміри є точними у будь-якому діапазоні вологості деревини. Спосіб придатний до просоченої деревини	Потребує значного часу, спосіб можна реалізувати лише у лабораторних умовах внаслідок потреби специфічного обладнання
Гігрометричний	Застосовують волосяний гігрометр. У зроблений у деревині отвір вставляють голку гігрометра. Після досягнення температури деревини 30 °С отримують значення вологості по показах шкали гігрометра	Спосіб є швидшим за два попередні і може застосовуватись у виробничих умовах	Може застосовуватися лише у діапазоні вологості нижче за 30% , має невелику точність, потребує калібрації приладу і попереднього свердління деревини
Колориметричний	Застосовують хімічні індикатори. У зроблений у деревині отвір вставляють індикаторний папір і тривають 10 хвилин, після чого порівнюють колір паперу із початковим кольором. Зміна кольору свідчить про вологість деревини	Спосіб є швидшим за два перші і може застосовуватись у виробничих умовах	Може застосовуватися лише у діапазоні вологості 5%-25% , має дуже невелику точність, попереднього свердління деревини

Назва способу	Опис та необхідне обладнання	Переваги	Недоліки
Електричний (ДСТУ 4922:2008[13])	Застосовують прилади електричні – кондуктометричні або ємнісні. Результат вимірювання отримують після занурення у деревину давачів приладу кондуктометричного та прикладання до її поверхні ємнісного приладу	Спосіб може застосовуватись у виробничих умовах ( малі габарити приладів, можливість швидкого отримання результатів вимірів, автоматизації і реєстрації вимірів)	Може застосовуватись у обумовленому конструкцією приладу діапазоні вологості. Точність вимірювання залежить від температури, породи та щільності деревини, напрямку волокон, а для ємнісного способу ще й від шорсткості поверхні та товщини пилопродукції

Вищенаведені способи вимірювання вологості належать до контактних способів, як і ультразвуковий спосіб, що знаходиться поки у стадії розроблення аналогічно як і безконтактні способи як-то магнітного резонансу, ізотопний.

#### 1.4. Гігроскопічні властивості деревини

Деревина є гігроскопічним матеріалом, і в будь-який час може змінювати вміст вологи, залежно від параметрів навколишнього середовища. У разі довготривалої витримки у кліматичному середовищі вона прагне набути певної вологості, яка називається стійкою вологістю. Поглинаючи вологу з повітря набуває стійкої вологості сорбції,  $W_{cc}$ , %, а віддаючи – стійкої вологості десорбції,  $W_{cd}$ , %. Ці процеси не є оберненими.

Максимальна кількість води, яку деревина може поглинути з атмосфери прийнято називати вологістю межі гігроскопічності,  $W_{\text{мг}}$ , %. Її величина залежить від температури навколишнього середовища. За кімнатної температури  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  межа гігроскопічності для більшості порід деревини становить  $W_{\text{мг}} = 30\%$ . У разі збільшення температури до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  вона зменшується до  $19\% - 20\%$ .

Проілюструвати процеси сорбції та десорбції можна помістивши зразок деревини у середовище з постійними параметрами температури,  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$  і відносної вологості повітря,  $\phi$ , % (або у відносних одиницях). При цьому можна спостерігати такі явища:

- у разі якщо початкова вологість зразка  $W = 0\%$ , то деревина поглинати вологу з повітря, тобто відбувається процес сорбції. (рис 1.24);
- якщо початкова вологість зразка є більшою за межу гігроскопічності  $W_{\text{поч}} > W_{\text{мг}}$ , то вода випаровуватиметься з деревини – відбувається процес десорбції (рис.1.25).

Різниця між  $W_{\text{сд}}$  -  $W_{\text{сс}} = \Delta W$  називають гістерезисом сорбції. Його величина залежить від товщини зразка деревини. У подрібненої деревини величина гістерезису дуже мала  $\Delta W = 0,2\%$ , а у деревини товщиною більше за  $15\text{ мм}$  та довжиною більше  $100\text{ мм}$  – становить  $\Delta W = 2,5\%$ .

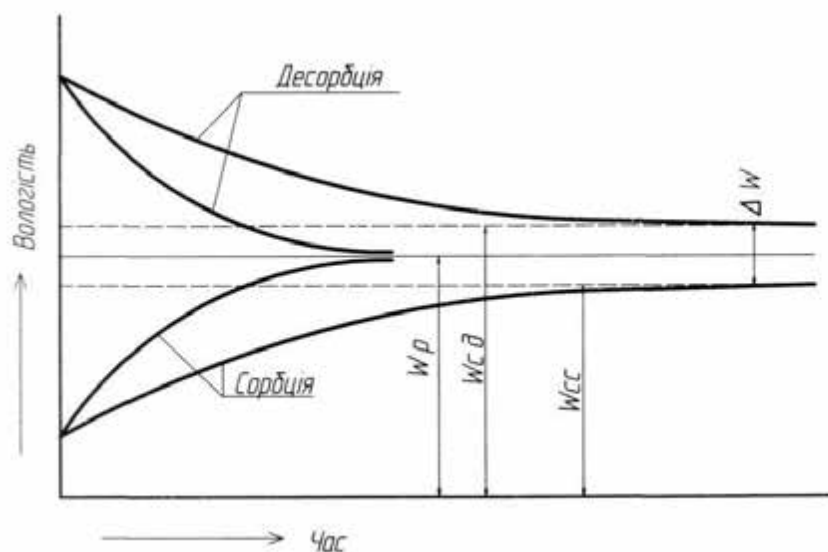


Рисунок 1.24. Криві сорбції та десорбції деревини [14]

Звідси випливає, що вологість подрібненої деревини, витриманої довгий час при конкретних значеннях температури і відносної вологості повітря, називається рівноважною  $W_p$ , %. Значення рівноважної вологості були визначені великою кількістю випробувань для багатьох деревних порід. Це дозволило визначити середні її значення – рис.1.25.

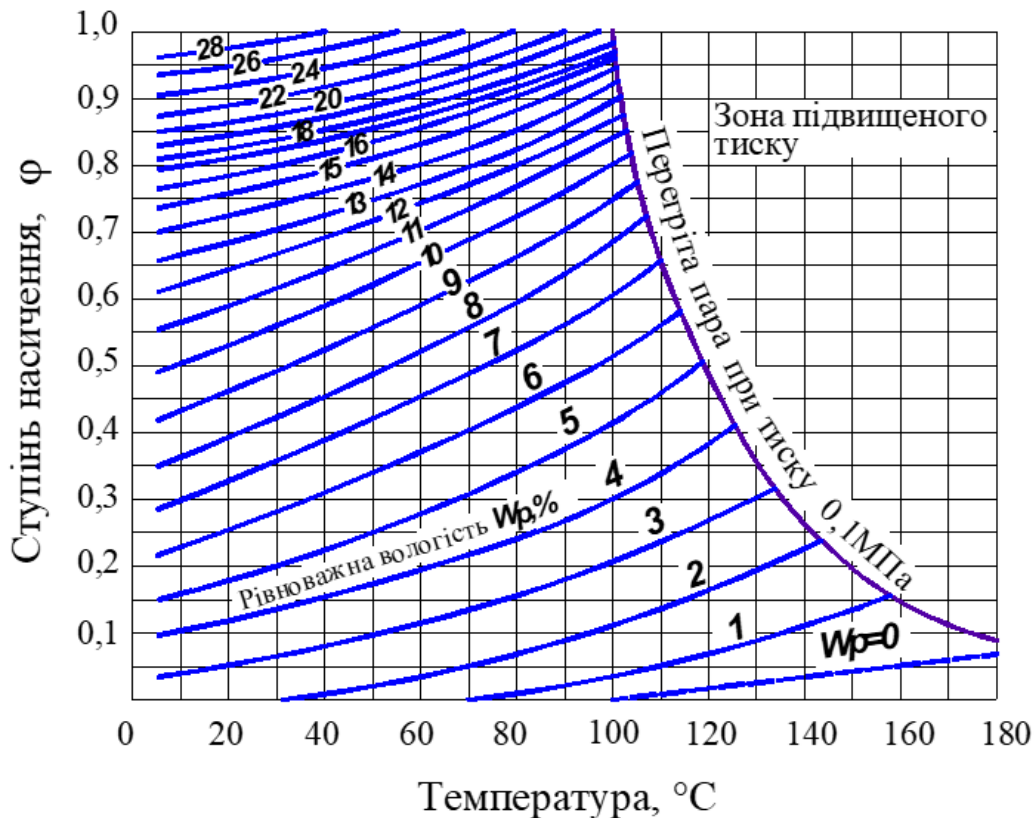


Рисунок 1.25. Діаграма рівноважної вологості деревини [14]

З цієї діаграми видно, наприклад, що деревина, яка знаходиться у повітряному середовищі з параметрами  $t = 15^\circ \text{C}$  та  $\phi = 0,7$ , буде прагнути для досягнення рівноважної вологості  $W_p = 14\%$ . Підвищення температури до  $20^\circ \text{C}$ , що супроводжується падінням відносної вологості до  $0,5$  призводить до того, що деревина втрачає вологу до нового рівноважного стану –  $W_p = 10\%$ . Навпаки, підвищення вологості повітря чи зменшення температури або те й інше змусило б деревину вбирати вологу.

Користуючись діаграмою рівноважної вологості, можна встановити постійну вологість при сорбції і десорбції для різних способів сушіння – табл.1.4

Таблиця 1.4. Визначення постійної вологості деревини

Спосіб сушіння	У разі десорбції	У разі сорбції
Атмосферний	$W_{cd} = W_p + \frac{\Delta W}{2}$	$W_{cc} = W_p - \frac{\Delta W}{2}$
Камерний	$W_{cd} = W_p$	$W_{cc} = W_p - \Delta W$

Після камерного сушіння деревина є меншу гігроскопічною, тому при зволоженні менше вбирає вологи.

Значення рівноважної вологості деревини також можна визначити за допомогою виразу [15]:

$$W_p = 10,6^{\varphi} (3,27 - 0,015t) . \quad (1.6)$$

Для визначення вологості межі гігроскопічності за різної позитивної температури можна скористатися [15 ]:

$$W_{\text{мг}} = 34,1 - 0,139t, \quad (1.7)$$

У діапазоні від'ємних температур оточуючого деревину середовища  $-17^{\circ}\text{C} < t < 0^{\circ}\text{C}$  значення вологості межі гігроскопічності можна визначити за [16]:

$$W_{\text{мг}} = 12 + 19,5e^{0,055t} . \quad (1.8)$$

Деревина належить до матеріалів, розміри яких є нестабільними і змінюються у разі зміни температури та вологості. Температурні деформації деревини є незначними особливо якщо її вологість є низькою. Вологісні деформації – значно більші. Вони проявляються у зменшенні розмірів у разі зниження її вологості або збільшенні розмірів у разі підвищення вологості. Перше явище називається усиханням, а друге – розбуханням, які є зворотними. Це пов'язано із особливістю будови деревини та її взаємодією із вологою.

Поглинання молекул водяної пари поверхнею стінок анатомічних елементів викликає потовщення прошарків адсорбційної вологи і, відповідно, збільшення товщини клітинних стінок, що призводить до розбухання

деревини. Зменшення товщини клітинних стінок підчас видалення вологи сприяє усиханню деревини.

Розбухання сухої деревини у повітрі або парі припиняється тоді, коли деревина набуде вологості межі гігроскопічності  $W_{\text{мг}}$ . Якщо деревина довгий час буде знаходитись у воді, то її розбухання припиниться після досягнення вологості межі насичення клітинних стінок –  $W_{\text{мн}}$ .

Розрізняють абсолютне та відносне усихання або розбухання. Перше характеризується зміною розмірів сортименту у метричних одиницях; друге – визначають відношенням абсолютного значення до розміру зразка. Визначення відносного усихання у відсотках по відношенню до розміру зразка у вологому стані, а відносного розбухання – до розміру зразка у абсолютно сухому стані.

Для гідротермічного оброблення схильність деревини до усихання має особливе значення, оскільки впливає на якість проведення найбільш енергоємного і довготривалого процесу її оброблення – сушіння. Величина усихання залежить від структурного напрямку зміни лінійного розміру, діапазону зміни вологості та породи деревини. Найменше усихання спостерігається уздовж волокон і його зазвичай не приймають до уваги; найбільше усихання спостерігається у тангенціальному напрямку. У радіальному напрямку величину усихання стримують серцевинні промені, уздовж яких розташовані деревні волокна; її величина приблизно у два рази менша, ніж у тангенціальному напрямку. Об'ємне усихання враховує сумарну зміну розмірів і не залежить від структурного напрямку.

Величина усихання пропорційна зменшенню вологості деревини у діапазоні нижче  $W < 30\%$  і найбільше його значення – так зване максимальне усихання,  $Y_{\text{max}}$ , %, мають зразки, що висихають від вологості межі насичення до абсолютно сухого стану. Величину усихання до заданої вологості  $W$  можна визначити за :

$$Y_W = \frac{Y_{\text{max}}}{W_{\text{мн}}} (W_{\text{мн}} - W) = K_y (W_{\text{мн}} - W), \quad (1.9)$$

де  $K_y$  – коефіцієнт усихання, %/% вологості, – табл.1.5.

Вираз (1.9) є справедливим для у разі сушіння тонких зразків із рівномірною зміною вологості. Дещо інша закономірність спостерігається у разі сушіння зразків промислової товщини, що спостерігається на практиці. Вологість поверхні досить швидко стає нижчою за середню вологість сортименту, набуваючи значення нижче  $W = 30\%$ . Тому зміна розмірів матеріалу починається за середньої вологості більшої за 30 %. Величину такої зміни розмірів для різних порід деревини можна визначити за ДСТУ 4920:2008 [17].

Величина усихання залежить від породи деревини, основною характеристикою якої є щільність. Чим більшу щільність має деревина, тим більш компактною є її будова. Мірою компактності, а саме вмісту деревинної речовини у одиниці об'єму прийнято вважати базову (умовну) щільність,  $\rho_b$ ,  $\text{кг м}^{-3}$ , тобто масу деревину у абсолютно сухому стані,  $m_0$ , до об'єму за вологості вище межі насичення клітинних стінок,  $V_{\text{мн}}$ :

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_{\text{мн}}}. \quad (1.10)$$

Середні значення базової щільності вітчизняних порід деревини наведено у табл.1.5

Таблиця 1.5. Середні значення базової щільності промислових порід деревини та коефіцієнтів усихання

Порода	Базова (умовна) щільність деревини, $\rho_b$ , $\text{кг(м)}^{-3}$	Коефіцієнти усихання, %/% вологості		
		Тангентальний, $K_t$	Радіальний, $K_r$	Об'ємний, $K_o$
Береза	520	0,31	0,17	0,49
Бук	560	0,33	0,19	0,52
В'яз	535	0,32	0,18	0,50
Граб	640	0,38	0,21	0,60
Груша	585	0,35	0,20	0,55
Дуб	570	0,34	0,19	0,53
Верба	380	0,23	0,13	0,35
Клен	570	0,34	0,19	0,53

Продовження таблиці 1.5

Порода	Базова (умовна) щільність деревини, $\rho_b$ , кг(м) <sup>-3</sup>	Коефіцієнти усування, %/% вологості		
		Тангентальний, $K_t$	Радіальний, $K_p$	Об'ємний, $K_o$
Липа	400	0,24	0,13	0,37
Вільха	430	0,26	0,14	0,40
Горіх грецький	490	0,29	0,16	0,46
Осика	410	0,25	0,14	0,38
Тополя	375	0,23	0,13	0,35
Ясен	560	0,34	0,19	0,52
Ялина	365	0,22	0,12	0,34
Ялиця	350	0,21	0,12	0,33
Сосна	415	0,25	0,14	0,39
Модрина	540	0,32	0,18	0,47

Експериментальні дослідження максимального усування [14,18] значної кількості деревних порід дозволили визначити її залежність від базової щільності – табл.1.6.

Таблиця 1.6. Визначення величини максимального усування

Об'ємне усування,%	Усування у тангенціальному напрямку,%	Усування у радіальному напрямку,%
$Y_{об\ max} = 0,028\rho_b$	$Y_{t\ max} = 0,018\rho_b$	$Y_{p\ max} = 0,010\rho_b$

Анізотропія усування впливає на форму поперечного перетину дошок випиляних з різних частин колоди – рис.1.26

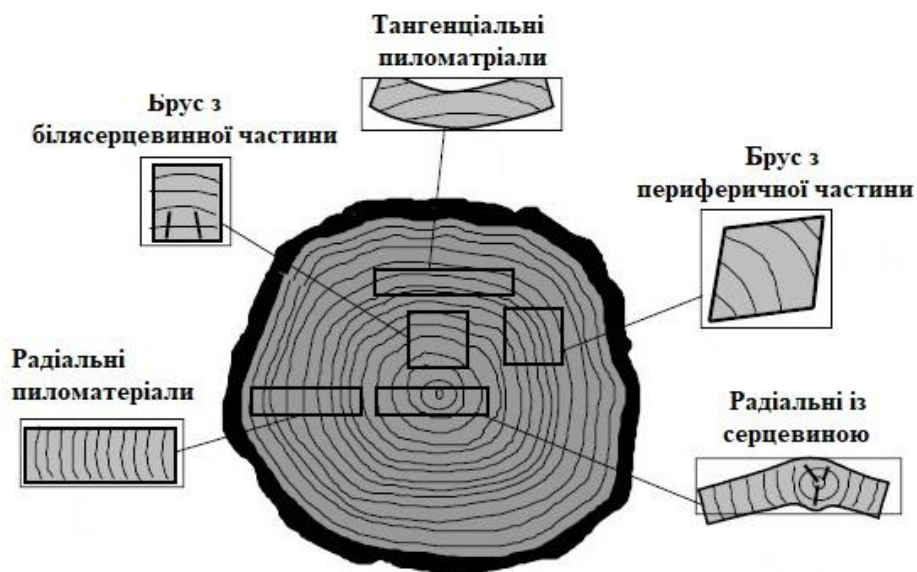


Рисунок 1.26. Зміна форми сортиментів, випиляних з різних частин стовбура після сушіння [9]

Видно, що лише радіальні пиломатеріали без серцевини зберігають свою прямокутну форму; тангенціальні пиломатеріали після сушіння можуть набути форми корита; радіальні пиломатеріали із серцевиною змінюють прямокутну форму внаслідок значного усихання деревини серцевини у тангенціальному напрямку; квадратний брус, випиляний з біля серцевинної частини може змінити форму на прямокутну, а випиляний з периферичної частини – на ромб.

### 1.5. Вплив вмісту вологи та термічного оброблення на фізико-механічні властивості деревини

Важливою характеристикою деревини є щільність, значення якої змінюються залежно від вмісту вологи. Визначити щільність вологої деревини можна знаючи її базову (умовну) щільність за рівняннями, наведеними у табл.1.7 або за діаграмою – рис.1.27

Таблиця 1.7. Визначення щільності вологої деревини,  $\rho_w, \text{кг (м)}^{-3}$

Для вологості деревини $W > 30\%$	$\rho_w = \rho_6 \left( 1 + \frac{W}{100} \right)$
Для вологості деревини $W \leq 30\%$	$\rho_w = \rho_6 \frac{(100 + W)(100 + K_o 30)}{100(100 + K_o W)}$

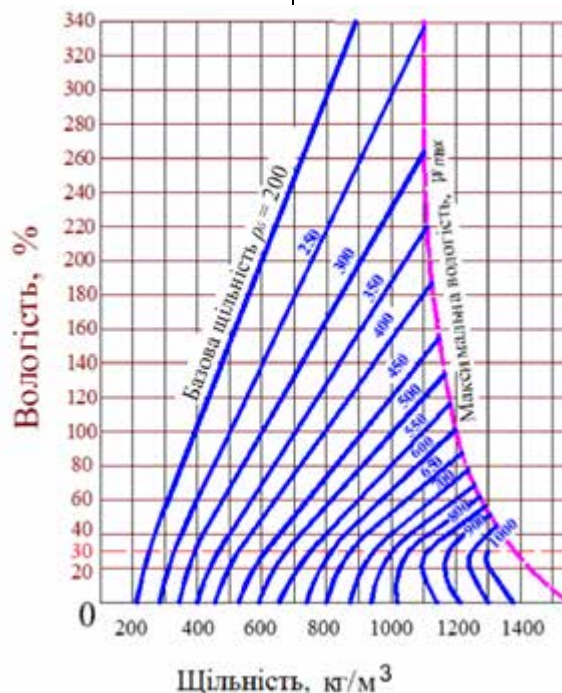


Рисунок 1.27. Діаграма щільності деревини [14]

Теплові властивості деревини мають значення для розрахунку товщини стінок дерев'яних конструкцій і для розрахунку процесів теплового оброблення. Основними показниками теплових властивостей є питома теплоємність,  $c$ , кДж (кг °С)<sup>-1</sup>, та коефіцієнт теплопровідності,  $\lambda$ , Вт(м °С)<sup>-1</sup>.

Під питомою теплоємністю розуміють кількість теплоти, необхідної для нагрівання одиниці маси матеріалу на 1 °С. Питома теплоємність не є постійною величиною і змінюється від температури і вологості деревини. Її значення у діапазоні позитивних та від'ємних температур відрізняються, оскільки відрізняється теплоємність води і криги. Від породи деревини питома теплоємність не залежить.

Визначити питому теплоємність можна за допомогою рівнянь – табл.1.8 або за діаграмою – рис.1.28.

Таблиця 1.8 Визначення питомої теплоємності,  $c$ , кДж (кг °С)<sup>-1</sup> для різного діапазону температур [15]

$-60^{\circ}\text{C} \leq t < 0^{\circ}\text{C}$	$c = (20t + 243u + 2200)^{-3}$
$0^{\circ}\text{C} \leq t \leq 100^{\circ}\text{C}$	$c = (3,5t + 3200 - 218(130 - 100u)^{0,228})^{-3}$

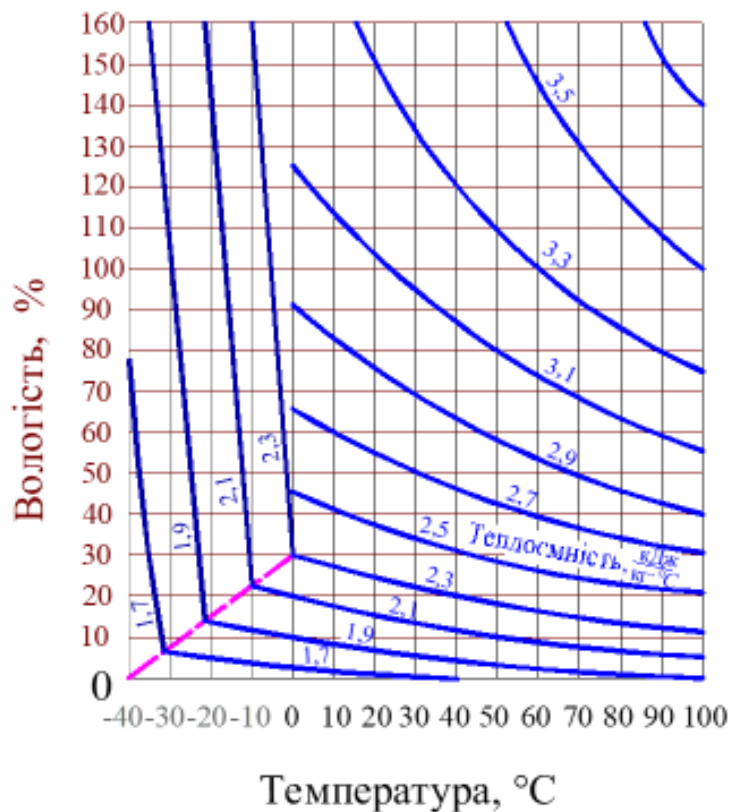


Рисунок 1.28. Діаграма питомої теплоємності деревини

Коефіцієнт теплопровідності характеризує інтенсивність переміщення теплоти у матеріалі. Чисельно він дорівнює кількості теплоти, що проходить за одиницю часу через пласку стінку площею  $1 \text{ м}^2$  і товщиною  $1 \text{ м}$  за різниці температур на протилежних боках стінки у  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Теплопровідність деревини залежить від її температури, вмісту вологи та напрямку потоку теплоти відносно волокон.

Значення коефіцієнту теплопровідності суттєво зростають у разі підвищення вологості деревини за будь-якої температури. Вплив температури є неоднозначним – за від’ємних температур значення коефіцієнту теплопровідності є більшим, ніж за позитивних значень температури у 1,07-1,3 рази залежно від вологості деревини. Розповсюдження теплоти уздовж волокон забезпечує збільшення коефіцієнту теплопровідності майже у два рази порівняно із поперечним напрямком.

Визначити коефіцієнт теплопровідності деревини можна до добутком номінального,  $\lambda_{\text{ном}}, \text{Вт}(\text{м } ^\circ\text{C})^{-1}$ , коефіцієнту (для берези  $\rho = 500 \text{ кг}(\text{м})^{-1}$ ) – рис.1.29, на корегуючи коефіцієнти:

$$\lambda_{\text{ном}} = K_{\rho} K_x, \quad (1.11)$$

де  $K_{\rho}, K_x$  – коефіцієнти, що враховують вплив базової щільності деревини ( табл. 1.9) та напрям теплового потоку ( табл.1.10)

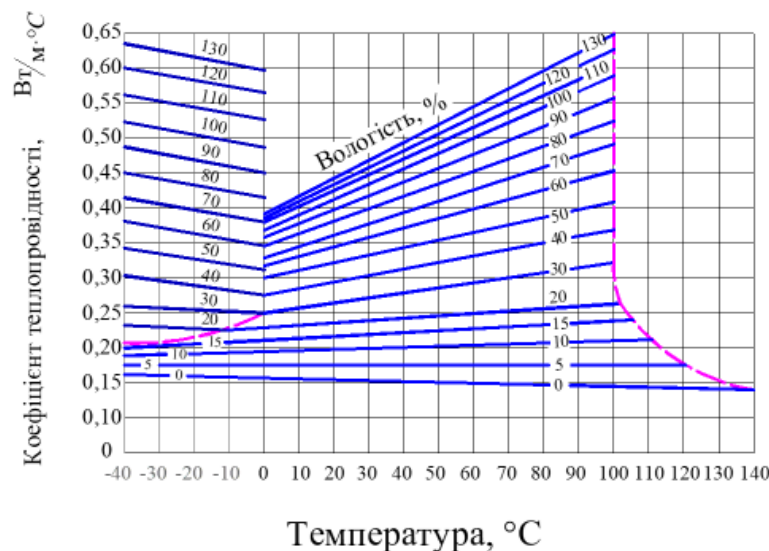


Рисунок 1.29. Діаграма номінального коефіцієнту теплопровідності деревини поперек волокон [14 ]

Таблиця 1.9. Значення коефіцієнта  $K\rho$  залежно від базової щільності [14]

$\rho_6, \text{кг(м)}^{-3}$	350	400	450	500	550	600	650
$K\rho$	0,81	0,87	0,93	1,00	1,11	1,26	1,45

Таблиця 1.10. Значення коефіцієнта  $K_x$  залежно від напрямку теплового потоку [14]

Група порід деревини	Коефіцієнт $K_x$ у напрямку теплового потоку		
	Радіальний	Тангенціальний	Уздовж волокон
Хвойні	1,0	1,0	2,2
Листяні з не розвинутими серцевинними променями (береза, осика липа...)	1,0	1,0	2,0
Листяні з розвинутими серцевинними променями (дуб, бук, клен...)	1,0	0,87	1,8

Визначити коефіцієнти теплопровідності деревини поперек волокон можна також за допомогою рівнянь – табл.1.11

Таблиця 1.11. Визначення коефіцієнту теплопровідності деревини,  $\lambda, \text{Вт(м } ^\circ\text{C)}^{-1}$ , поперек волокон для різного діапазону вологості [15]

$5\% \leq W \leq 100\%$	$\lambda = \frac{0,222Wt + 10^{0,295lgW-1,022}}{1,864 - 0,00175\rho_6}$
$100\% < W \leq 130\%$	$\lambda = \frac{(0,131W + 0,09)t + 10^{0,295lgW-1,022}}{1,864 - 0,00175\rho_6}$

Електричні властивості деревини мають велике значення для проведення деяких процесів гідротермічного оброблення та операцій їх контролю. До основних показників електричних властивостей деревини відносять електропровідність та діелектричну провідність. Саме ці властивості використані у приладах вимірювання вологості деревини.

Електропровідність – це спроможність деревини проводити електричний струм і зворотна величина електричному опору. Електрична провідність деревини залежить від її вологості, температури, породи та напрямку відносно волокон. Найбільший вплив робить вологість – характер впливу якої змінюється у діапазонах вище та нижче вологості межі гігроскопічності  $W_{\text{мг}}$ . Якщо вологість деревини є більшою за межу гігроскопічності  $W > W_{\text{мг}}$ , то у разі зменшення вологи електропровідність незначно знижується. Зменшення вологості деревини за вологість межі гігроскопічності  $W < W_{\text{мг}}$  спостерігається значне зниження провідності і, відповідно, збільшення опору. Так, у разі зниження вологості деревини від 30% до 0% опір підвищується у сотні тисяч разів. За вологості деревини нижче 7% – 8% вона стає ізолятором. У напрямку поперек волокон опір деревини є більшим у 3 – 4 рази, ніж у поздовжньому напрямку.

Підвищення температури призводить до зменшення питомого опору особливо у деревині порівняно низької вологості. Збільшення температури від 20 °С до 90 °С знижує опір абсолютно сухої деревини у мільйон разів, а деревини вологістю 22% – 24% лише у 100 разів.

Діелектрична проникність деревини характеризує порівняльну ємність конденсатора у разі використання її у якості діелектрика. Залежить діелектрична проникність деревини від частоти електричного поля, його напрямку відносно волокон деревини, вологості, температури та щільності деревини.

Підвищення частоти електричного поля викликає зниження діелектричної проникності. Уздовж волокон діелектрична проникність абсолютно сухої деревини у 1,4 рази більше, ніж поперек волокон. Збільшення вологості деревини від 10% до 60% за однакової частоти електричного поля збільшує її діелектричну проникність у 1,5 – 3,0 рази. Підвищення температури від -40 °С до 100 °С призводить до незначного збільшення діелектричної проникності абсолютно сухої деревини. Вплив зміни щільності від 300 кг(м)<sup>-3</sup> до 800 кг(м)<sup>-3</sup> деревини у абсолютно сухому стані на її

діелектричну проникність сприяє збільшення останньої у 1,8 разів. Підвищення вологості деревини до  $W=12\%$  у вказаному діапазоні щільності викликає збільшення діелектричної проникності у 2,1 рази.

Міцність деревини залежить від породи, температури і вологості. Під час сушіння вологість і температура деревини змінюються, тому і міцність не залишається постійною. Вологість деревини впливає на її міцність лише у діапазоні нижче межі гігроскопічності  $W < W_{\text{мг}}$ . При зниженні вологості в цьому діапазоні міцність помітно збільшується, а при збільшенні – зменшується. Зміни міцності за кімнатної температури є зворотними – міцність, що знизилась при зволоженні сухої деревини, відновлюється, якщо її знову висушити до первісної вологості.

Підвищення температури приводить до зниження міцності деревини. Короткочасна дія невисокої температури викликає переважно зворотні зміни міцності. Проте, із підвищенням температури і збільшенням тривалості її дії починають проявлятися залишкові зміни, які залишаються і після оброблення і впливають на міцність деревини під час її подальшої експлуатації. Це обумовлено впливом високої температури на хімічну структуру деревинної речовини.

Розрізняють міцність деревини в процесі оброблення і експлуатаційну міцність, якої набуває деревина після доведення її вологості і температури до звичайних експлуатаційних норм. Міцність деревини з вологістю нижче межі гігроскопічності знижується у процесі оброблення з підвищенням температури – рис. 1.30.

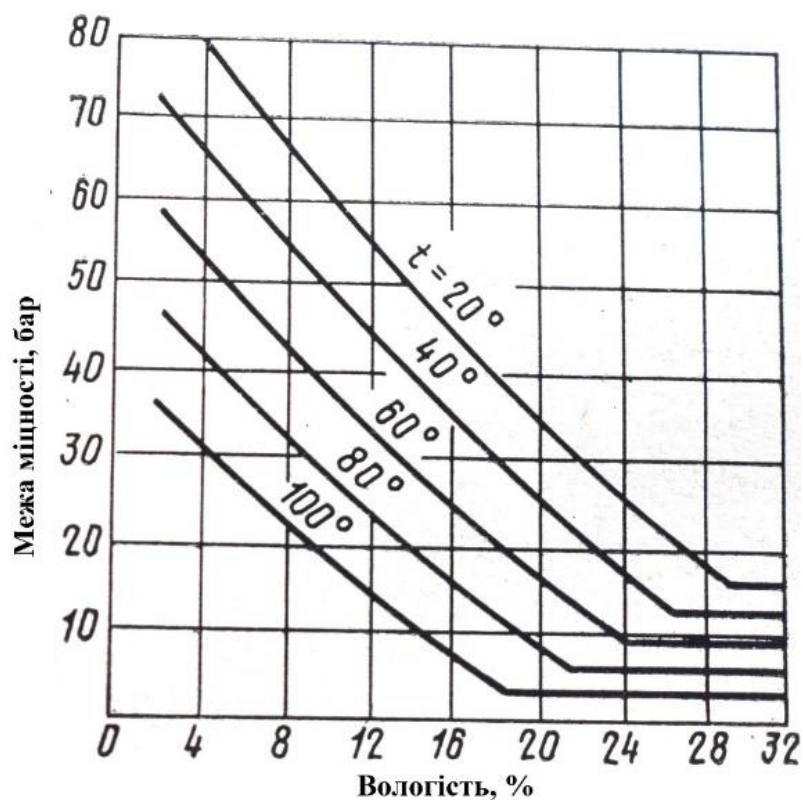


Рисунок 1.30. Діаграма межі міцності деревини берези під час розтягу у тангенціальному напрямку [14]

Видно, що міцність гарячої сирої деревини берези менше ніж холодної сухої у 15-20 разів. Для інших порід деревини, як і для інших механічних показників закономірність залишається аналогічною. Абсолютні значення меж міцності і їхні співвідношення можуть коливатися.

Експлуатаційна міцність також залежить від породи і вологості деревини. Але на неї суттєвий вплив має характер попередньої гідротермічного оброблення. Еталонним значенням експлуатаційної міцності прийнято вважати міцність деревини, що була висушена при атмосферному сушінні, тобто не піддавалася дії підвищеної температури.

Дослідженнями встановлено, що вплив на деревину температури нижче 60 °C не знижує її експлуатаційної міцності незалежно від тривалості обробки. Наслідки дії більш високих температур починають проявлятися якщо термін обробки перевищує при  $t = 80^\circ \text{C}$  40–50 год, при  $t=100^\circ \text{C}$  4–5 год, при  $t=120^\circ \text{C}$  2–3 год.

З процесів гідротермічного оброблення деревини найбільш тривалим є сушіння. За інтенсивних режимів температура становить 120–130 °С, а термін її дії 30–60 год. За таких умов показники механічних властивостей деревини знижуються при розтягу, стиску і статичному вигині на 5–10%, а при сколюванні і динамічних навантаженнях на 15–25%.

Деформативність деревини при довготривалому навантаженні порівняно з іншими матеріалами (металом) має суттєві особливості. Особливості її деформування у часі свідчать про те, що вона не підпорядковується закону Гука. Якщо зразок навантажувати з постійною швидкістю протягом часу  $\tau$  і безперервно фіксувати відносну деформацію зразка  $\epsilon$ , графік залежності  $\tau$ - $\epsilon$  не буде прямолінійним, як для ідеально пружного тіла – рис.1.31.

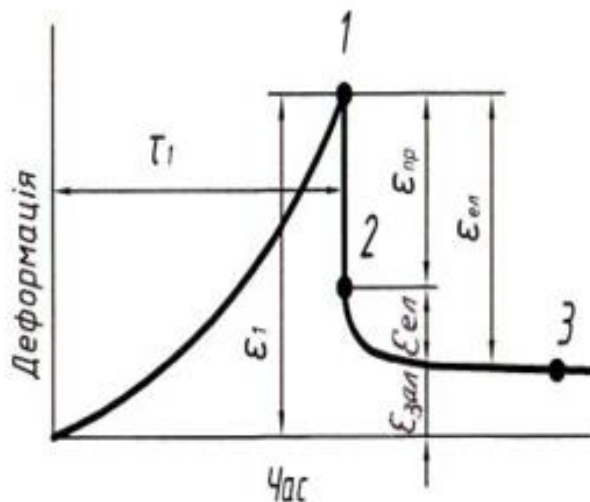


Рисунок 1.31. Крива деформацій деревини під час рівномірного навантаження і миттєвого розвантаження [14]

Повна деформація деревини виявляється складною величиною. У певний момент  $\tau_1$  повна деформація досягає величини  $\epsilon_{п}$ . Якщо миттєво розвантажити зразок, продовжуючи фіксацію відносної деформації можна побачити наступне: знизившись на величину 1-2 вона буде повільно зменшуватися (крива 2-3) наближуючись до певної постійної величини. Повна деформація  $\epsilon_{п}$ , таким чином, складається з пружної деформації  $\epsilon_{пр}$ , зворотної

еластичної  $\epsilon_e$  і незворотної залишкової  $\epsilon_{зал}$ . Загальна зворотна деформація, тобто сума пружної і еластичної має назву пружно-еластична.

Реологічними показниками, що характеризують розвиток у деревині пружно-еластичних деформацій  $\epsilon$ : миттєвий модуль пружності  $H$ , що визначає пружну деформацію, довготривалий модуль пружності  $E$ , який визначає пружно-еластичну деформацію, період релаксації  $n$ , що визначає розвиток еластичної деформації у часі. Час релаксації показує час, за який початок зменшення еластичної деформації від її рівноважного стану зменшується у 2,72 рази.

Незворотні залишкові деформації залежать від напруження та швидкості навантаження. За постійної швидкості навантаження вони приблизно пропорційні напруженню. Їх величину характеризують модулем залишкових деформацій  $K$ . У процесах гідротермічного оброблення стан деревини визначається переважно її розтягом поперек волокон – рис.1.32.

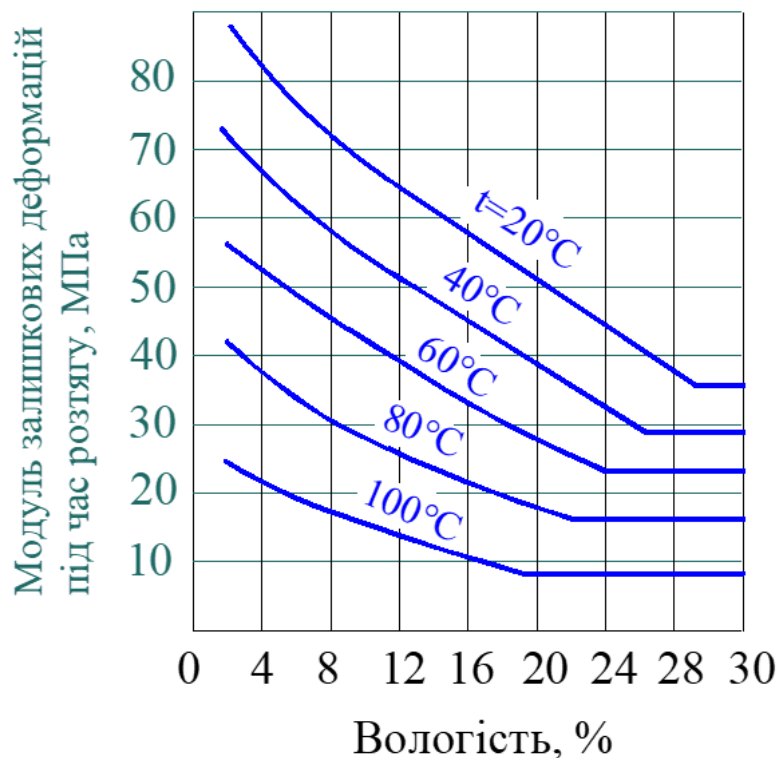


Рисунок 1.32. Діаграма модуля залишкових деформацій берези під час розтягу у тангенціальному напрямку [14]

Видно, що характер впливу температури і вологості деревини на жорсткість є аналогічним впливу на міцність. Звичайно, що на міцнісні та реологічні показники деревини впливає також порода деревини. Характер впливу не змінюється, лише абсолютні значення показників.

## 1.6. Приклади рішення задач

1. Визначити величину рівноважної вологості деревини температури  $t=70\text{ }^{\circ}\text{C}$  і відносної вологості повітря  $\varphi=0,8$ .

За діаграмою рівноважної вологості деревини (рис.1.24)  $W_p=14\%$ , за (1.6) –  $W_p=14,8\%$ ,

2. Визначити мінімальну вологість, до якої можуть висушитися дошки за  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і  $\varphi=0,4$ .

$$W_p = 8\%, \text{ згідно табл.1.4 } W_{cd} = 8\% + 1,25\% = 9,25\%.$$

3. Встановити максимальну вологість, до якої можуть зволожитися дошки, попередньо висушені у камері до  $W=6\%$ , при зберіганні на свіжому повітрі з параметрами:  $t=15^{\circ}\text{C}$  і  $\varphi=0,8$ .

Для заданого стану повітря  $W_p = 17,0\%$ ; згідно табл.1.4  $W_{cc} = 17,0\% - 2,5\% = 14,5\%$ .

4. Знайти щільність деревини сосни при вологості  $W = 80\%$ , а також її максимальні щільність і вологість.

За табл.1.5  $\rho_{\delta}=415\text{ кг(м)}^{-3}$  З точки перетину  $\rho_{\delta}=415\text{ кг(м)}^{-3}$  та  $W = 80\%$  слід опуститися вертикально вниз. Щільність сосни за вологості  $W = 80\%$  дорівнює  $\rho=740\text{ кг(м)}^{-3}$ . Результат розрахунку за табл.1.6 –  $\rho=747\text{ кг(м)}^{-3}$ . Для визначення максимальної щільності та вологості деревини сосни слід продовжити лінію  $\rho_{\delta}=415\text{ кг(м)}^{-3}$  до перетину з лінією  $W_{max}$ . На їх перехресті опустившись вертикально вниз на осі  $X$  знаходимо значення максимальної

щільності  $\rho_{max}=1130 \text{ кг(м)}^{-3}$ , а на осі  $Y$  значення максимальної вологості  $W_{max}=175\%$ .

5. Знайти величину усихання у радіальному напрямку букової деревини від вологості у свіжозрубаному стані до вологості  $W = 8\%$ .

Для бука  $\rho_b=560 \text{ кг(м)}^{-3}$  – табл.1.5. Повне усихання у радіальному напрямку за табл.1.6  $U_{pmax} = 0,01 560 = 5,6\%$ . Величина усихання за вологості  $W = 8\%$  за (1.9.) –  $U_{8\%} = 5,6 (1 - 8/30) = 4,10 \%$ .

6. Знайти величину припуску на усихання у тангенціальному напрямку листа шпона шириною 200 мм ( у напрямку усихання) від вологості  $W = 60\%$  до  $W = 4\%$ .

За табл.1.5  $\rho_b=520 \text{ кг(м)}^{-3}$ ; за табл.1.6  $U_{pmax}=0,018 520 = 9,4 \%$ ; за (1.9)  $U_{4\%}=9,4 (1-4/30)=8,14\%$ ; величина припуску  $200 (8,14/100) = 1,6 \text{ мм}$ .

7. Сирі радіальні дошки з деревини берези товщиною 50 мм складені у штабель на сухих каліброваних прокладках товщиною 25 мм. Висота сирого штабелю 2,6 м. Визначити висоту штабеля за кінцевої вологості 8%.

На рис. 1.33 видно, що штабель пиломатеріалів сформовано таким чином, що кількість рядів дошок у ньому на один більше, ніж рядів перекладок. Зазвичай штабель формують з дошок однією породи та товщини але випиляних з різних частин стовбуру. Дошки випиляні з периферійної частини називаються тангенціальними, а з центральної частини – радіальними (рис.1.34).



Рисунок 1.33. Дошки складені у штабель

Таким чином кількість дошок за умовами задачі становитиме 35, тобто  $(2600 \text{ мм} - 50 \text{ мм}) / (50 \text{ мм} + 25 \text{ мм}) = 34$  шт. плюс верхня дошка.

Для визначення величини усихання радіальних дошок слід прийняти до уваги, що напрям по товщині у них тангенціальний –рис.1.34

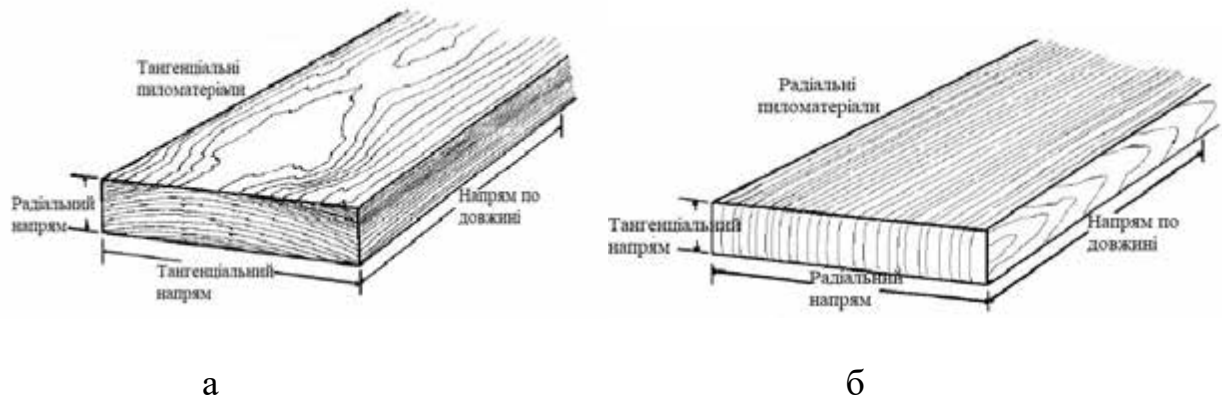


Рисунок 1.34. Дошки різного розпилювання: а–тангенціальні, б–радіальні

За табл.1.5  $\rho_0 = 520 \text{ кг(м)}^{-3}$ ; за табл.1.6  $U_{\text{max}} = 0,018 \cdot 520 = 9,4 \%$ ; за (1.9)  $U_{8\%} = 9,4 (1 - 8/30) = 6,9 \%$ . Кожна дошка усохне на  $6,9\%$  і її розмір зменшиться на  $(50 \text{ мм} \times 6,9) / 100 = 3,45 \text{ мм}$ . Враховуючи кількість дошок штабель пиломатеріалів зменшиться на  $120,7 \text{ мм}$  і становитиме  $2479,3 \text{ мм}$ .

### 1.7 Контрольні запитання

1. На які три види поділяються вологі тіла за характером зв'язку з водою?
2. Що таке стійка вологість сорбції?
3. Що таке стійка вологість десорбції?
4. Що таке гістерезис сорбції?
5. Як можна встановити постійну вологість при сорбції і десорбції для атмосферного сушіння?
6. Як можна встановити постійну вологість при сорбції і десорбції для камерного сушіння?
7. Яка залежність між усиханням та базовою щільністю?

8. Як визначити величину усихання до конкретної вологості?
9. Що таке припуски на усихання і як їх визначають?
10. Які основні теплові властивості деревини, що впливають на процеси гідротермічного оброблення?
11. Від яких залежать питома теплоємність та теплопровідність деревини?
12. Як впливають процеси гідротермічного оброблення деревини на її міцність?
13. Як впливають зміни вологості деревини на її міцність?
14. Як впливають зміни температури деревини на її міцність?
15. Що таке міцність у процесі оброблення і експлуатаційна міцність?
16. Як впливають процеси гідротермічного оброблення деревини на її деформативність?
17. Назвіть реологічні показники деревини.

## 2. ВЛАСТИВОСТІ ОБРОБЛЯЮЧОГО ДЕРЕВИНУ СЕРЕДОВИЩА

Рідке або газоподібне середовище, що діє на деревину під час її оброблення називається агентом оброблення. Це може бути водяна пара, атмосферне повітря та його суміш із топковими газами, вода, водні розчини або органічні рідини. Більшість процесів сушіння відбуваються під тиском, близьким до атмосферного ( $0,1 \text{ МПа} = 10 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ бар} = 1 \text{ технічна атмосфера}$ ).

Для розуміння та успішного проведення процесів гідротермічного оброблення деревини необхідно знати властивості агентів її оброблення.

### 2.1. Властивості водяної пари

Водяна пара може перебувати в одному з таких станів: мокрому, сухому насиченому і перегрітому. Стан її характеризується: тиском -  $p$ , питомим об'ємом -  $v$ , температурою -  $t$ .

Взаємозалежності між цими величинами для реального газу характеризуються  $p$  $v$ -діаграмою Ендрюса – рис.2.1.

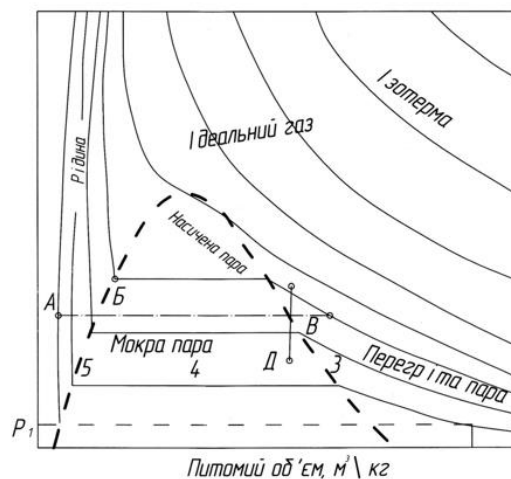


Рисунок 2.1.  $p$  $v$ -діаграма Ендрюса [14]

За досить високої температури, коли сили зчеплення між молекулами речовини незначні, воно знаходиться у газоподібній формі і залежність тиску від питомого об'єму визначається рівнянням стану ідеального газу. За низької температури речовина може змінювати свій агрегатний стан. Якщо її тиск

незначний ( $p_1$ ), речовина за відповідної температури є ще газом і має великий питомий об'єм. При стисканні такого газу за постійної температури, його тиск спочатку із зменшенням питомого об'єму спочатку буде зростати за гіперболічною кривою (1-2). Однак після досягнення певного стану (3) зменшення питомого об'єму на ділянці (3-4-5) відбуватиметься без підвищення тиску. На цій ділянці газ перетворюється у рідину, відбувається конденсація. Точка (5) характеризує момент закінчення конденсації, а саме перетворення у рідину всього об'єму газу, після чого (5-6) навіть незначне зниження питомого об'єму викликає різке збільшення тиску.

Отже, на діаграмі можна виділити такі області: газ, перегріта пара, мокра пара, рідина. Найвища температура, за якої речовина може існувати у рідкій фазі (найвища точка пунктирної параболи) називається критичною температурою. Межею між перегрітою і мокрою парою є насичена пара – дуже нестабільний стан пари. У стані насичення пара може знаходитись лише за певного співвідношення між тиском і температурою. Інакше кажучи, кожному тиску відповідає чітко визначена температура насичення пари і, навпаки, кожній температурі відповідає певне значення тиску насичення – рис.2.2 (табл. А2). Температура насичення дорівнює температурі точки кипіння води за даного тиску.

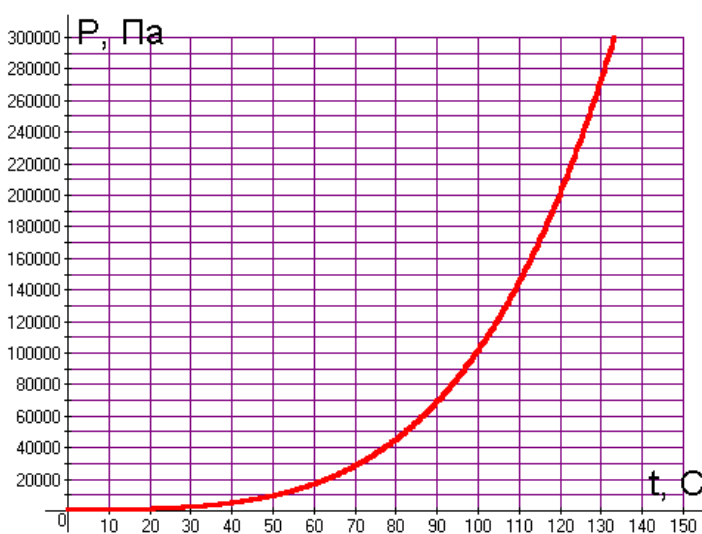


Рисунок 2.2. Графік залежності між температурою і тиском насичення водяної пари

Нагрівання насиченої пари за постійного тиску приводить до утворення перегрітої пари. Тиск цієї пари буде меншим за тиск насичення, який відповідає новій більш високій температурі. Така пара може поглинати вологу до тих пір поки не стане знову насиченою.

Відношення тиску пари певної температури, тобто парціального тиску,  $p_n$ , до тиску насичення,  $p_n$ , що відповідає цій температурі, називають ступінь насичення пари,  $\varphi$ , (відносна вологість, відносна пружність пари), Вона вимірюється у (%) або відносних одиницях:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} 100\% . \quad (2.1)$$

Якщо парціальний тиск пари дорівнює тиску її насичення  $p_n = p_n$ , то  $\varphi = 1$ , і пара не може бути сушильним агентом, тому що не спроможна випарювати вологу з матеріалу. Тому при сушінні деревини використовують перегріту пару. Саме така пара є складовою частиною повітря або топкових газів. Основні її параметри з точністю, що необхідна для інженерних розрахунків, визначаються з рівнянням Менделєєва-Клапейрона:

$$p_n v = R_{\text{пар}} T , \quad (2.2)$$

де  $v$  – питомий об'єм пари  $\text{м}^3 (\text{кг})^{-1}$ , величина обернена густині  $\rho$ ,  $\text{кг}(\text{м}^3)^{-1}$ ;  $R_{\text{пар}} = 461,58 \text{ Дж} (\text{кг} \text{ } ^\circ\text{К})^{-1}$  – газова стала пари, яка виражає роботу розширення 1 кг пари при збільшенні її температури,  $T$ , на  $1 \text{ } ^\circ\text{К}$  при постійному тиску.

## 2.2. Властивості атмосферного повітря

Атмосферне повітря складається із сухого повітря ( постійного за своїм складом: азот, кисень та ін.) і водяної пари. Сухе атмосферне повітря має постійний склад і його можна розглядати як ідеальний газ (газова стала повітря –  $R_{\text{пов}} = 287,14 \text{ Дж}(\text{кг} \text{ } ^\circ\text{К})^{-1}$ . Стан однорідного газу визначається двома параметрами – тиском,  $p$ , та температурою  $t$ . За постійного тиску (будемо вважати, що атмосферне повітря має постійний тиск 100 кПа) – тільки температурою.

Повітря, що застосовується у гідротермічному обробленні деревини не буває сухим, тому крім вищезначених параметрів  $(p, t)$  характеризується кількістю та станом водяної пари, що міститься в ньому. До таких параметрів, що характеризують стан вологого повітря відносять: парціальний тиск  $p_n$ , ступінь його насичення  $\varphi$ , вологовміст  $d$ , тепловміст  $I$ , густина  $\rho$ , приведений питомий об'єм  $V_{np}$ .

Атмосферний тиск вологого повітря дорівнює сумі парціальних тисків сухого повітря,  $p_{пов}$ , та водяної пари,  $p_n$ , що знаходиться у повітрі:

$$p_a = p_{пов} + p_n. \quad (2.3)$$

Водяна пара у суміші з повітрям веде себе так само, якби займала одна весь об'єм суміші. Максимальна величина її парціального тиску за даної температури обмежується тиском насичення  $p_n$ . Якщо парціальний тиск буде нижчим за тиск насичення, пара у повітрі буде перегрітою, а коли парціальний тиск буде дорівнювати тиску насичення, пара стане насиченою. Коли повітря, що має насичену пару буде охолоджуватися, то ця пара перетворюється на мокру.

Абсолютна вологість повітря – це маса водяної пари в одиниці об'єму вологого повітря,  $v_n$ , інакше кажучи, це густина водяної пари у повітрі,  $\rho_n$ , :

$$\rho_n = \frac{1}{v_n} = \frac{p_n}{R_n T}. \quad (2.4)$$

Абсолютна вологість насиченого повітря показує максимально можливий за даної температури вміст в ньому пари і називається вологоємністю,  $\rho_n$ :

$$\rho_n = \frac{1}{v_n} = \frac{p_n}{R_n T}. \quad (2.5)$$

Відносна вологість повітря,  $\varphi$ , – це відношення його абсолютної вологості до вологоємності:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n} = \frac{p_n}{p_n} \quad (2.6)$$

Інакше кажучи, відносна вологість повітря характеризує ступінь насиченості його водяною парю.

Під час розрахунків обладнання для гідротермічного оброблення деревини визначають кількість повітря, що приймає участь у обробленні. Визначення кількості повітря за його об'ємом або загальної маси є незручним, оскільки ці величини під час зміни стану повітря також змінюються. Тому прийнято підраховувати кількість повітря по масі його сухої частини ( тобто без водяної пари). Для цього було введено додатковий параметр, що характеризує кількість пари у повітрі – вологовміст  $d$ , г (кг сух. пов)<sup>-1</sup>.

Вологовміст – це маса водяної пари, що припадає на 1 кг сухої частини повітря. З врахуванням відомих рівнянь ідеального газу для повітря і пари із відповідними значеннями газових сталих вологовміст можна визначити таким чином:

$$d = 622 \frac{p_p}{p_a - p_p}, \quad (2.7)$$

де  $p_a$  – тиск атмосферного повітря, Па.

Тепловміст (ентальпія) повітря характеризується сумарним тепловмістом повітря,  $i_{\text{пов}}$ , та водяної пари,  $i_{\text{пар}}$ , що знаходиться в ньому. Його обчислюють по відношенню до одиниці маси (1 кг) сухої частини повітря. Оскільки на 1 кг сухої частини повітря припадає 0,001d кг водяної пари, то ентальпію можна виразити через суму, кДж(кг)<sup>-1</sup>:

$$I = i_{\text{пов}} + 0,001d i_{\text{пар}}, \quad (2.9)$$

де  $i_{\text{пар}}$  – теплоємність пари:

$$i_{\text{пар}} = r_0 + c_{\text{пар}} t, \quad (2.10)$$

де  $r_0$  - прихована теплота пароутворення  $r_0 = 2490$  кДж(кг)<sup>-1</sup> при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $c_{\text{пар}} = 1,93$  кДж(кг °C)<sup>-1</sup> – середня теплоємність пари температурою  $0^\circ\text{C}$  –  $150^\circ\text{C}$ .

Враховуючи (2.9) і (2.10) та теплоємність повітря  $c_{\text{пов}} = 1,0$  кДж (кг °C)<sup>-1</sup>:

$$I = 1,0t + 0,001d(1,93t + 2490). \quad (2.11)$$

Як видно, за нульовий тепловміст умовно приймається тепловміст абсолютно сухого повітря при  $0^\circ\text{C}$ . За низьких температур він може бути від'ємним.

Густина і питомий об'єм повітря визначають відповідно за (2.12) та (2.13):

$$\rho = \frac{349 - 132 \cdot \frac{d}{622 + d}}{273 + t}, \quad (2.12)$$

$$V_{\text{пр}} = 4,63 \cdot 10^{-6} \cdot (273 + t)(622 + d). \quad (2.13)$$

Використовуючи вищенаведені рівняння можна вирішувати різні задачі з визначення стану вологого повітря.

### 2.3. Діаграми стану повітря

Розглянуті вище параметри вологого повітря можуть бути визначені за допомогою *Id*-діаграми вологого повітря. Вперше *Id*-діаграма, що встановлює зв'язок між параметрами вологого повітря була розроблена в 1918 році російським вченим Рамзіним Л.К. Ця діаграма побудована у координатах тепловміст *I* і вологовміст *d*, кут між якими є тупим для більш повного використання її площі і становив  $135^\circ$ . Схема побудови *Id*-діаграми наведена на рис.2.3.

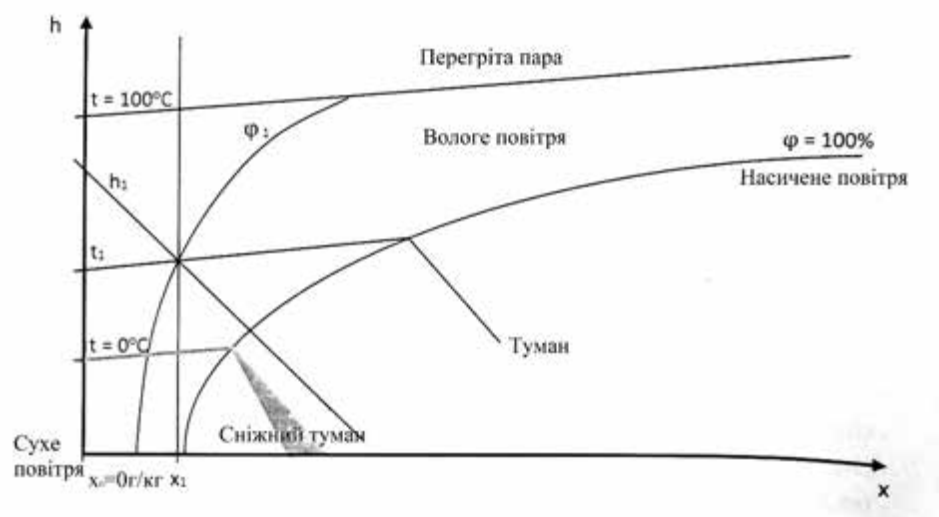


Рисунок 2.3. Спрощена схема *Id*-діаграми [19]

Величина кута між лініями *I* і *d* не має принципового значення. Зручніше користуватися варіантом *Id*-діаграми з кутом між координатними осями  $170^\circ$ , запропонованим Кречетовим І.В. – рис.2.4 (рис. А1).

Використання  $Id$ -діаграми дозволяє не лише перевіряти отримані аналітичним шляхом параметри повітря, але й аналізувати їх зміну під час розрахунку пристроїв.

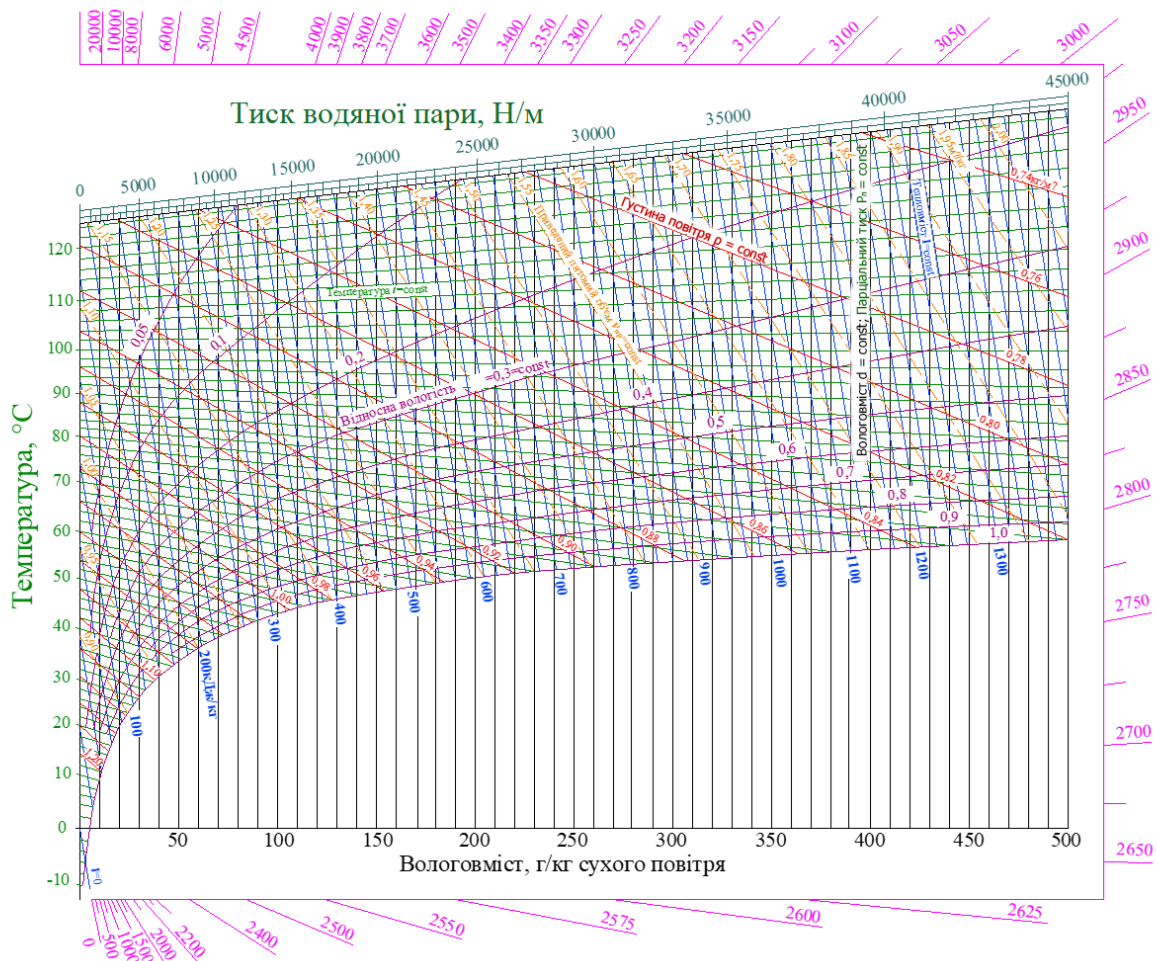


Рисунок 2.4.  $Id$ -діаграма вологого повітря [20]

На  $Id$ -діаграму нанесено сім'ю таких ліній: вологовмісту  $d$  - вертикальні прямі лінії; тепловмісту  $I$  - похилі криві під кутом  $170^\circ$  до ліній  $d$ ; температури  $t$  - прямі, що проходять під невеликим кутом до горизонталі; ступені насичення  $\phi$  - пучок кривих. Крива  $\phi=I$  поділяє діаграму на дві ділянки: верхню, яка відповідає стану повітря, що містить перегріту пару, і нижню, що визначає стан повітря, який містить мокру пару. Стан повітря, що містить насичену пару, характеризується лінією  $\phi=I$ .

Лінії парціального тиску водяної пари на діаграму не наносять, а використовують лінії  $d=\text{const}$ , оскільки між величинами  $d$  та  $p_n$

спостерігається однозначна залежність. Також на діаграмі нанесені сім'ї прямих: густини  $\rho = const$  та приведенного питомого об'єму  $v = const$ .

Для аналізу процесів, що відбуваються під час кондиціонування або конденсаційному сушінні, які відбуваються за температури нижче  $t < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  зручніше користуватися варіантом  $Id$ -діаграми для температур у діапазоні від  $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq +50\text{ }^{\circ}\text{C}$  – рис. 2.5.

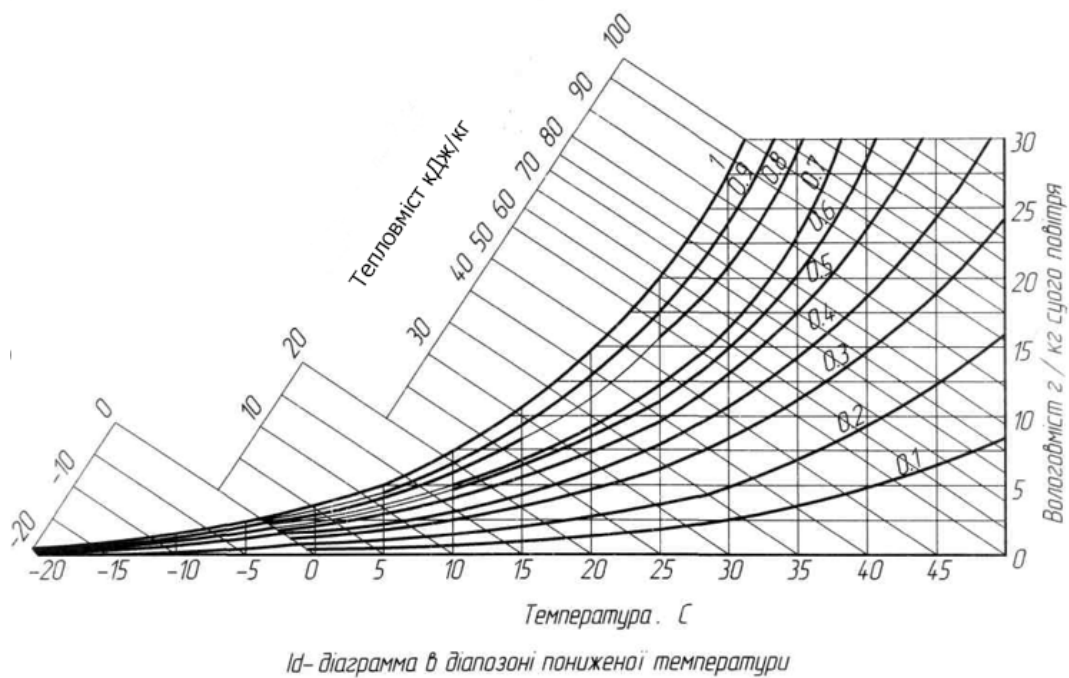


Рисунок 2.5.  $Id$ -діаграма у діапазоні знижених температур повітря

За допомогою цих діаграм по двох заданих параметрах (якщо вони не є рівнозначними) можна знайти інші параметри.

Для підігрівання повітря або інших агентів оброблення деревини використовують топкові гази, які утворюються при згорянні дров, дерев'яних відходів, природного газу і мазуту. У суміші з вологим повітрям топкові гази використовують для сушіння подрібненої деревини, шпону і пиломатеріалів.

Стан топкових газів залежить від виду і складу палива, його вологості та умов горіння. У процесі горіння хімічна енергія палива перетворюється на теплову. Елементарний склад деревного палива (сухої деревини) мало залежить від породи і його можна вважати постійним. У початковий стан деревного палива входять такі компоненти: вуглець – 35,3%; водень – 4,2%;

кисень – 29,4%; азот – 0,4%; зола – 0,7%; вологість (відносна вологість деревини) – 30%.

Фізичні властивості газів мало відрізняються від властивостей атмосферного повітря. Тому для визначення стану топкового газу може бути застосована  $Id$ -діаграма з розширеною температурною шкалою. З метою встановлення взаємозалежності параметрів газу із складом та вологістю палива, а також умовами горіння останнього у топці на  $Id$ -діаграму наносять додаткові лінії постійної відносної вологості палива  $W=const$  і коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha=const$ . Така діаграма запропонована Кречетовим І.В., має назву  $Id\alpha$  –діаграма топкових газів – рис. 2.6 (рис. А2).

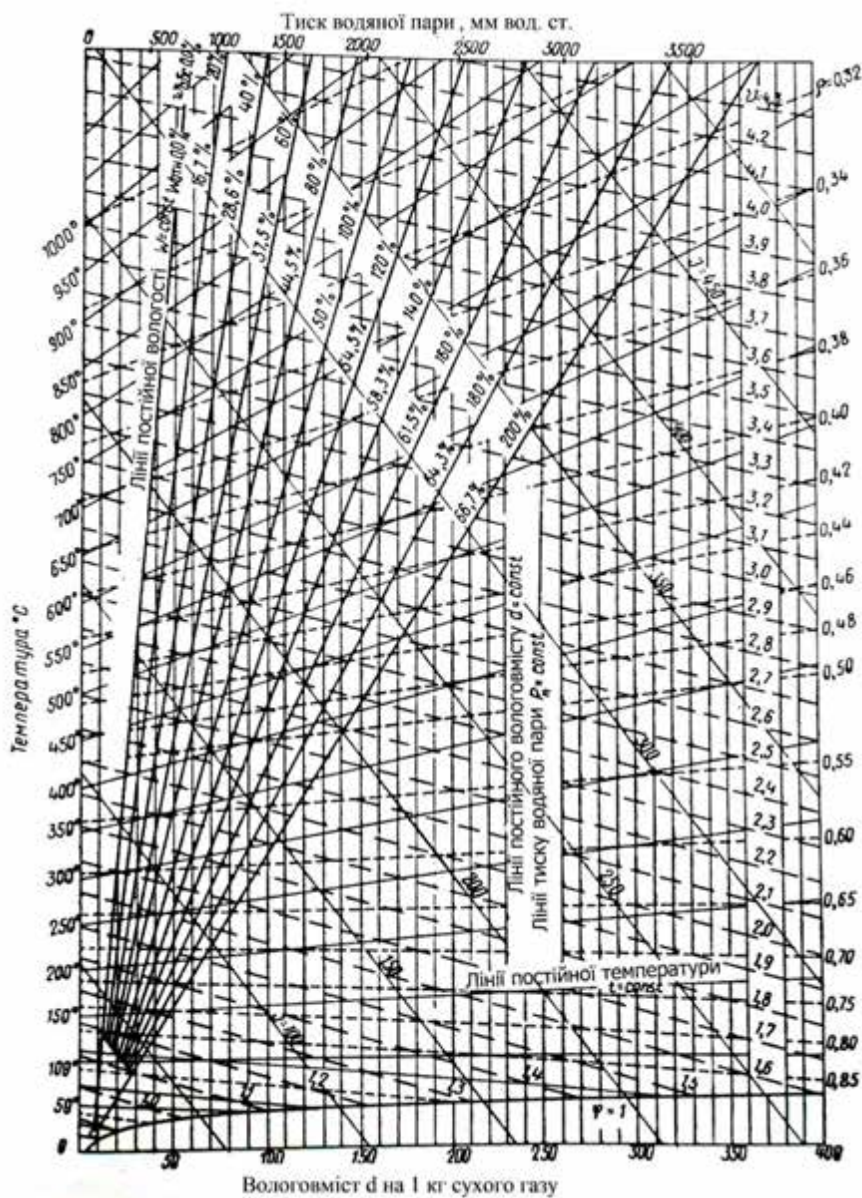


Рисунок 2.6.  $Id\alpha$  –діаграма топкових газів [20]

Для зручності користування на лініях постійної вологи нанесено значення відносної та абсолютної вологості палива.

Коефіцієнт надлишку повітря є основною характеристикою умов горіння палива. Він показує величину відношення кількості повітря, що витрачається на спалювання палива до кількості теоретично необхідного повітря для повного спалювання цього палива. Для отримання топкового газу як агенту сушіння спалювання палива проводять за  $\alpha > 1$ .

У разі повного спалювання палива вміст вуглекислого газу,  $\text{CO}_2$ , %, залежить лише від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  і визначається із співвідношення:

$$\text{CO}_2 = \frac{20,2}{\alpha} \quad (2.14)$$

Таким чином, кожній величині  $\alpha$  відповідає вміст  $\text{CO}_2$  і на лініях  $\alpha = \text{const}$  наведено дані  $\text{CO}_2$ , що допомагає аналізувати стан топкових газів, коли вміст  $\text{CO}_2$  визначається газоаналізатором.

*Ida*-діаграма для деревного палива може бути застосована також для аналізу стану газів, що отримані при спалюванні мазуту та природнього газу. Процес горіння мазуту досить точно характеризується на *Ida*-діаграмі лінією постійної вологості  $W = 0\%$ , а природнього газу  $-W = 20\%$ . Також на *Ida*-діаграмі нанесені лінії постійної густини газу та приведенного питомого об'єму, які можуть бути використані як для топкових газів і їх сумішей, так і для повітря підвищеної температури [14].

## 2.4. Процеси змішування повітря різних станів

Під час гідротермічного оброблення деревини найбільш характерними є процеси зміни стану повітря, а саме нагрівання та охолодження повітря у теплообмінниках, випаровування вологи у повітря і змішування повітря різних станів. Ці процеси зручно відобразити та аналізувати, використовуючи діаграми вологого повітря.

Нагрівання та охолодження повітря у теплообмінниках відбувається у результаті його дотику із сухою нагрітою або холодною поверхнею. У разі нагрівання повітря підвищується його температура, збільшується тепловміст, знижується ступінь насиченості. Кількість вологи у повітрі лишається постійною, тобто вологовміст залишається постійним.

На  $Id$ -діаграмі нагрівання повітря, первинний стан якого характеризується точкою 1 (рис.2.7), відображено вертикальною прямою 1-2, паралельною лінії  $d=const$ . Охолодження повітря пов'язано із зниженням його температури, тепловмісту і підвищенням ступені насиченості (лінія 1-3).

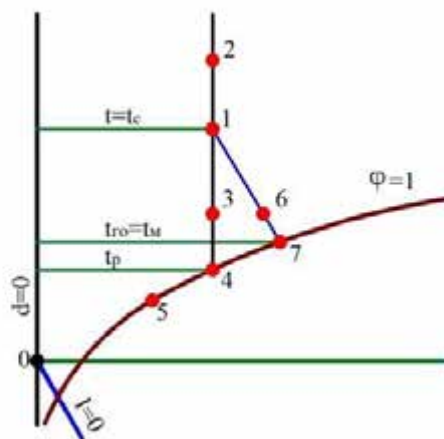


Рисунок 2.7. Ілюстрація процесів нагрівання, охолодження повітря та випаровування вологи на фрагменті  $Id$ -діаграми

Під час охолодження за певних умов повітря може досягти стану насичення (точка 4). Подальше його охолодження буде супроводжуватися конденсацією водяної пари (відрізок 4-5) і зменшенням вологовмісту. Стан, за якого повітря охолоджується при дотику до сухої поверхні, досягає насичення називається точкою роси, а температура, що відповідає цьому стану називається температурою роси  $t_p$ .

Випаровування повітрям вологи відбувається тоді, коли воно містить перегріту пару і дотикається до поверхні води або вологого тіла. За таких умов температура повітря знижується, а ступінь насиченості і вологовміст

підвищуються. Тепловміст залишається постійним, тому що теплота витрачена на випаровування передається парі і залишається в ній у вигляді прихованої теплоти пароутворення.

Вихідний стан повітря характеризується точкою 1 (рис.2.7) і процес випаровування відображено прямою 1-6, паралельної лінії  $I=const$ . Під час випаровування повітря може насититися водяною парою (точка 7). Такий стан відповідає рівновазі між паром у повітрі і рідиною. Температура повітря і кількість вологи, що міститься у ньому, будуть залишатися постійними. Точка 7 характеризує стан повітря, що називається границею охолодження під час випаровування або границею охолодження. Температура, за якої повітря випаровуючи вологу досягне стану насичення, називається температурою границі охолодження  $t_{20}$ . Мокре тіло, що омивається повітрям, за досить тривалого терміну, набуває температури, що дорівнює температурі границі охолодження. За атмосферного тиску вона завжди менше  $t_{20} < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , але якщо  $t_{20}=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то це вже чиста перегріта пара.

Температура границі охолодження може бути виміряна змоченим термометром, тобто термометром у якого чутливий елемент, кулька, огорнутий тканиною, що змочується у воді. Змочений термометр у парі із звичайним термометром (сухим) утворює психрометр – рис.2.8.

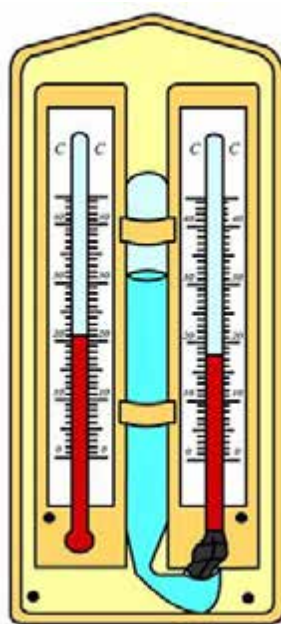


Рисунок 2.8. Загальний вигляд психрометру

По показаннях сухого  $t_c$  та змоченого  $t_m$  термометрів та з допомогою  $I-d$  діаграми можна визначати усі параметри повітря. Для цього на діаграмі потрібно знайти точку перетину ізотерми  $t_m$  із кривою  $\varphi=1$  (точка 7 на рис.2.7). Через неї проводять лінію  $I=const$  до перетину з лінією  $t_c$ . Отримана точка 1 буде характеризувати стан повітря. Крім того ступінь насиченості  $\varphi$  може бути визначено за психрометричними таблицями (Табл. А3).

Для операторів сушильних пристроїв важливим є процеси змішування повітря різних станів, оскільки для забезпечення нормальної роботи сушарок, необхідно розбавляти насичене вологою відпрацьоване повітря, що знаходиться всередині, свіжим. Розглянемо випадок, коли відпрацьоване повітря, що знаходиться у сушарці  $M_2$ , кг, (кількість повітря обчислюють за масою його сухої частини) змішується із свіжим повітрям  $M_0$ , кг. У сушильній техніці прийнято позначати індексом «0» свіже повітря, індексом «1» – повітря, що надходить до висушувального матеріалу, індексом «2» – відпрацьоване повітря. Стан суміші залежить від стану компонентів повітря та їх співвідношення,  $n$ , яке прийнято називати коефіцієнтом пропорції суміші:

$$n = \frac{M_2}{M_0}. \quad (2.15)$$

Щоб визначити параметри суміші повітря, необхідно скласти рівняння балансу теплоти й вологи. Якщо до 1 кг свіжого повітря у стані 0 додати  $n$  кг повітря в стані 2, рівняння балансу матимуть такий вигляд:

$$1I_0 + nI_2 = I_{\text{сум}}(n + 1), \quad (2.16)$$

$$1d_0 + nd_2 = d_{\text{сум}}(n + 1). \quad (2.17)$$

Тоді параметри суміші можна визначити:

$$I_{\text{сум}} = \frac{I_0 + nI_2}{1+n}, \quad (2.18)$$

$$d_{\text{сум}} = \frac{d_0 + nd_2}{1+n}. \quad (2.19)$$

Параметри суміші повітря різних станів можна визначити графічно, попередньо поділивши рівняння балансу тепла на рівняння балансу вологи. В результаті чого отримано рівняння прямої лінії з координатами  $I_0, d_0, I_2, d_2$ :

$$\frac{I_2 - I_{\text{сум}}}{d_2 - d_{\text{сум}}} = \frac{I_{\text{сум}} - I_0}{d_{\text{сум}} - d_0} \quad , \quad (2.20)$$

звідки видно, що точка, яка характеризує стан і параметри суміші, незалежно від величини  $n$  знаходиться на прямій 0–2. Щоб знайти положення точки суміші на прямій 0–2, яку слід побудувати на  $Id$  -діаграмі (рис.2.9), треба виміряти відстань між точками 0–2 і поділити її на  $n+1$  рівних частин. Якщо  $n > 1,0$ , то точка суміші розміщується ближче до точки 2, оскільки  $M_2 > M_0$ .

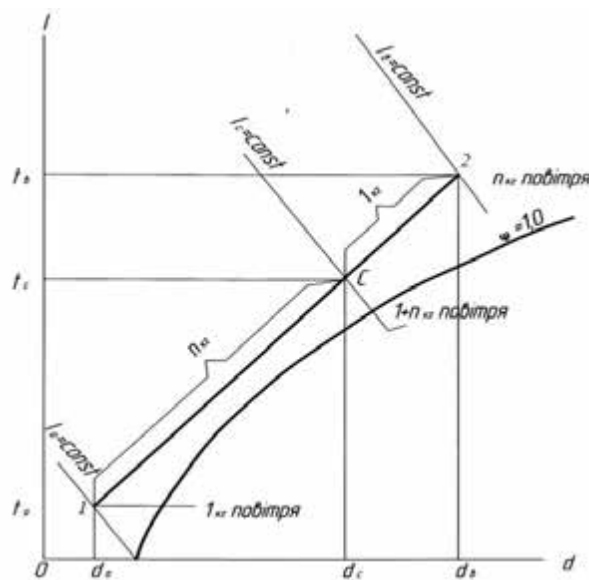


Рисунок 2.9. Візуалізація на  $Id$  -діаграмі процесу змішування повітря різних станів

Пряма 0–2 може перетнути криву  $\phi=1$  і точка стану суміші буде знаходитись нижче цієї кривої  $C_1$ , що є ознакою конденсації частини водяної пари в процесі змішування. Дійсний стан суміші після осадження конденсату визначає точка  $C_2$ , що знаходиться на перетині кривої  $\phi=1$  та лінії  $I=const$ , яка проходить через точку  $C_1$ .

На практиці інколи змішують повітря з парою і визначають параметри суміші. Якщо до 1 кг (тобто 1000 г) пари з ентальпією  $i_n$  додати  $n$  кг повітря (за масою сухої частини) з параметрами  $d_1$  і  $I_1$ , то маса сухої частини суміші

залишиться попередньою ( $n$  кг). Тоді параметри суміші обчислюють таким чином:

$$I_{\text{сум}} = I_1 + \frac{i_n}{n}, \quad (2.20)$$

$$d_{\text{сум}} = d_1 + \frac{1000}{n}. \quad (2.21)$$

Параметри суміші повітря з парою можна визначити графічно з допомогою  $Id$ -діаграми у такому порядку – рис.2.10 :

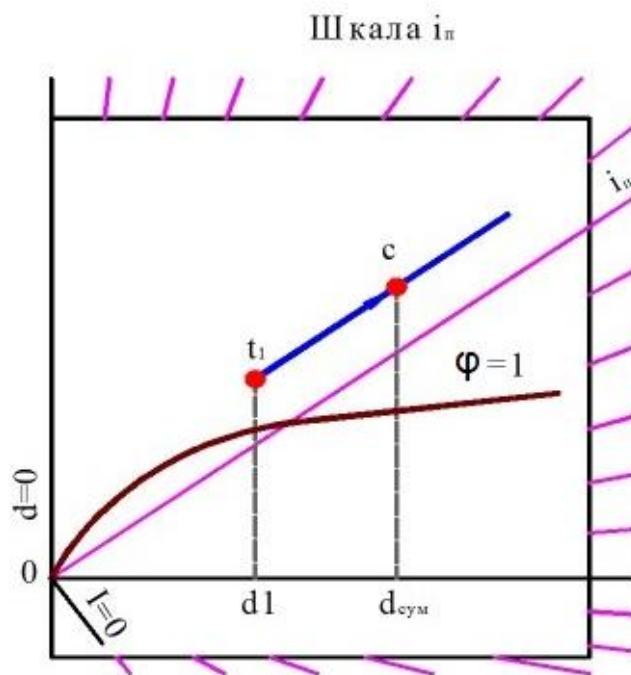


Рисунок 2.10. Візуалізація на  $Id$ -діаграмі процесу змішування повітря з парою  $\phi$

- за заданими параметрами  $I_1$  і  $d_1$  або  $t_1$  і  $\phi_1$  слід знайти положення точки 1 на  $Id$ -діаграмі;
- з початку координат необхідно провести пряму на кутову шкалу до значення  $i_n$  ентальпії пари;
- через точку 1 провести пряму, паралельну прямій  $\theta$ -  $i_n$ ;

- за вищенаведеною формулою (2.21) обчислити  $d_{\text{сум}}$  і на перетині лінії вологовмісту суміші та прямої паралельної  $\theta$ -  $i_n$ , визначити положення точки суміші.

## 2.5. Приклади рішення задач

**Задача 1.** Водяна пара під тиском 6500 Па має температуру 55 °С.

Встановити характеристику пари, його густину та ступінь насичення.

За даного тиску температура насичення становить (рис.2.2, табл. А2)  $t = 37$  °С. Таким чином пара, що має температуру  $t = 55$  °С є перегрітою. Цій температурі відповідає тиск насичення  $p = 17000$  Па.

Ступінь насичення за (2.1)  $\varphi = 6500/17000=0,38$  або 38%.

Густина пари з (2.2):  $\rho = 1/v = p/(R_n T) = 6500/(461,58 (273+55)) = 0,043$  кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>.

**Задача 2.** Відомі температура повітря 74 °С та ступінь його насиченості 0,47. Визначити парціальний тиск пари у повітрі, його вологовміст та тепловміст.

Заданій температурі відповідає тиск насичення водяної пари  $p_n=36956$  Па (рис.2.2, табл. А2).

Парціальний тиск визначають з рівняння (2.6) :

$$p_n = 36956 \times 0,47 = 17369 \text{ Па.}$$

Вологовміст визначають з рівняння (2.7):

$$d = 622 \times 17369 / (100000 - 17369) = 131 \text{ г(кг)}^{-1}.$$

Тепловміст визначають з рівняння (2.11):

$$I = 1,0 \times 74 + 0,131 (1,93 \times 74 + 2490) = 419 \text{ кДж(кг)}^{-1}.$$

**Задача 3.** Вологе повітря має температуру 86 °С і ступінь насичення 0,4. Визначити за допомогою  $I-d$ -діаграми решту параметрів цього повітря: тепловміст, вологовміст, парціальний тиск, густину та питомий об'єм.

На рис.2.4 (рис.А1) знаходимо точку за координатами  $t = 86$  °С і  $\varphi = 0,4$ . Для цієї точки визначено значення тепловмісту  $I = 650$  кДж(кг)<sup>-1</sup>;

вологівмісту  $d = 210 \text{ г(кг)}^{-1}$ ; парціального тиску  $p_n = 26000 \text{ Па}$ ; густини  $\rho = 0,873 \text{ кг(м}^3\text{)}^{-1}$ ; приведеного питомого об'єму  $v = 1,39 \text{ м}^3\text{(кг)}^{-1}$ .

**Задача 4.** На  $Id$ -діаграмі знайти температуру, тепловміст і вологовміст повітря насиченого вологою, якщо парціальний тиск пари складає  $30000 \text{ Па}$ .

Якщо повітря насичене вологою, то точка, що характеризує його стан знаходиться на перетинанні ліній  $\varphi = 1$  і  $p_n = 30000 \text{ Па}$ . Для цієї точки визначено значення температури  $t = 68 \text{ }^\circ\text{C}$ ; тепловмісту  $I = 745 \text{ кДж(кг)}^{-1}$ ; вологовмісту  $d = 260 \text{ г(кг)}^{-1}$ .

**Задача 5.** Вологе повітря має температуру  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  і ступінь насичення  $0,6$ . Знайти решту параметрів.

Використовуємо  $Id$  –діаграму для знижених температур (рис.2.5). Знаходимо точку з координатами  $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $\varphi = 0,6$ . Для цієї точки визначено значення вологовмісту  $d = 4 \text{ г(кг)}^{-1}$  і тепловмісту  $I = 22 \text{ кДж(кг)}^{-1}$ .

**Задача 6.** При спалюванні деревного палива за допомогою пірометра і газоаналізатора встановлено температуру  $t = 700 \text{ }^\circ\text{C}$  та вміст  $\text{CO}_2 = 10\%$ . Визначити тепловміст, вологовміст, густину, питомий об'єм, коефіцієнт надлишку повітря топкового газу і вологість палива.

Використовуємо  $Id\alpha$ -діаграму (рис. 2.6, рис. A2). Знаходимо точку перетину ліній температури  $t = 700 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $\text{CO}_2 = 10\%$ , що характеризує стан топкового газу. Для цієї точки визначено значення тепловмісту  $I = 1320 \text{ кДж(кг)}^{-1}$ ; вологовмісту  $d = 155 \text{ г(кг)}^{-1}$ ; густини  $\rho = 0,34 \text{ кг(м}^3\text{)}^{-1}$ ; питомого об'єму повітря  $v = 3,4 \text{ м}^3\text{(кг)}^{-1}$ ; коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha = 2,02$ ; відносної вологості палива  $W_n = 55,5\%$ .

**Задача 7.** Температура газу, отриманого при спалюванні природного газу, дорівнює  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ . Визначити тепловміст, вологовміст, коефіцієнт надлишку повітря, питомий об'єм, густину отриманого газу.

Знаходимо на  $Id\alpha$ -діаграмі (рис. 2.6, рис. А2) точку перетину ліній  $t=900$  °С і  $W_n=20\%$  , оскільки процес горіння природного газу характеризується лінією постійної вологості  $-W =20\%$ . Для цієї точки визначено значення тепловмісту  $I =1210$  кДж(кг)<sup>-1</sup>; вологовмісту  $d = 66$  г(кг)<sup>-1</sup>; густини  $\rho = 0,29$  кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>; питомого об'єму  $v=3,65$  м<sup>3</sup>(кг)<sup>-1</sup>; коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha =2,22$ .

**Задача 8.** Повітря, що має температуру 50 °С та ступінь насичення 0,7 нагрівають у теплообміннику до температури 90 °С. Знайти тепловміст та ступінь насичення нагрітого повітря користуючись  $Id$ -діаграмою.

Знаходимо точку з координатами  $t = 50$  °С і  $\varphi = 0,7$ . Згідно пояснень до рис.2.7 підіймаємось по лінії  $d=const$  до перетину з лінією  $t = 90$  °С . Координати отриманої точки  $d=70$  г(кг)<sup>-1</sup> і  $t = 90$  °С . Для цієї точки визначено значення тепловмісту  $I = 250$  кДж(кг)<sup>-1</sup>; відносної вологості повітря  $\varphi = 0,13$ .

**Задача 9.** Повітря, що має параметри:  $t = 90$  °С і  $\varphi = 0,2$  , проходить крізь шар сирого матеріалу і виходить з нього при температурі 70 °С. Використовуючи  $Id$  -діаграму визначити ступінь насичення повітря, що пройшло крізь матеріал.

Знаходимо точку з координатами  $t = 90$  °С і  $\varphi = 0,2$ . Згідно пояснень до рис.2.7 опускаємось по лінії  $I =const$  до перетину з лінією  $t = 70$  °С . Координати отриманої точки  $I = 380$  кДж(кг)<sup>-1</sup> і  $t = 70$  °С . Для цієї точки визначено значення відносної вологості повітря  $\varphi = 0,6$ .

**Задача 10.** Знайти температуру роси і температуру границі охолодження повітря з параметрами  $t = 94$  °С і  $\varphi=0,3$  використовуючи  $Id$  -діаграму.

Знаходимо точку з координатами  $t = 94$  °С і  $\varphi = 0,3$ . Згідно пояснень до рис.2.7 для визначення температури точки роси опускаємось по лінії  $d=const$  до перетину з лінією  $\varphi = 1$ . Координати отриманої точки  $d=210$  г(кг)<sup>-1</sup> і  $\varphi = 1$ . Для цієї точки визначено значення температури точки роси  $t_p = 65$  °С.

Для визначення температури границі охолодження опускаємось по лінії  $I = const$  до перетину з лінією  $\varphi = 1$ . Координати отриманої точки  $I = 660$  кДж(кг)<sup>-1</sup> і  $\varphi = 1$ . Для цієї точки визначено значення температури границі охолодження  $t_{zo} = 67$  °С.

**Задача 11.** Використовуючи  $Id$  –діаграму визначити по показах психрометру  $t_c = 75$  °С і  $t_m = 60$  °С ступінь насичення, вологовміст і тепловміст повітря.

Згідно рис.2.7 знаходимо точку перетину ізотерми  $t_m = 60$  °С та кривої  $\varphi = 1$ . Піднімаємось нагору по лінії  $I = const$  до перетину з ізотермою  $t_c = 75$  °С. Для цієї точки визначено значення відносної вологості повітря  $\varphi = 0,41$ ; вологовмісту  $d = 123$  г(кг)<sup>-1</sup> та тепловмісту  $I = 480$  кДж(кг)<sup>-1</sup>.

**Задача 12.** Змішують 50 кг повітря з параметрами  $t_1 = 60$  °С і  $\varphi_1 = 0,7$  і 25 кг повітря з параметрами  $t_2 = 92$  °С і  $\varphi_2 = 0,5$ . Визначити температуру і ступінь насиченості суміші аналітично та за  $Id$  –діаграмою.

Визначаємо параметри для повітря у стані 1:

Заданій температурі відповідає тиск насичення водяної пари  $p_n = 19918$  Па (рис.2.2).

Парціальний тиск визначають з рівняння (2.6) :

$$p_n = 19918 \times 0,7 = 13943 \text{ Па.}$$

Вологовміст визначають з рівняння (2.7):

$$d = 622 \times 13943 / (100000 - 13943) = 101 \text{ г(кг)}^{-1}.$$

Тепловміст визначають з рівняння (2.11):

$$I = 1,0 \times 60 + 0,101 \times (1,93 \times 60 + 2490) = 323 \text{ кДж(кг)}^{-1}.$$

Аналогічним чином визначаємо параметри повітря у стані 2:  $d = 334$  г(кг)<sup>-1</sup>;  $I = 982$  кДж(кг)<sup>-1</sup>.

Визначаємо коефіцієнт пропорції суміші за (2.15):

$$n = \frac{50}{25} = 2.$$

Визначаємо параметри суміші за (2.18) та (2.19):

$$I_{\text{сум}} = \frac{982+2 \cdot 323}{1+2} = 543 \text{ кДж(кг)}^{-1},$$
$$d_{\text{сум}} = \frac{334+2 \cdot 101}{1+2} = 179 \text{ г(кг)}^{-1}.$$

Підставляючи отримані значення у (2.11):

$$543 = 1,0t + 0,001 \cdot 179 (1,93t + 2490)$$

отримуємо значення температури суміші  $t = 72 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Парціальний тиск визначаємо із залежності (2.7) підставивши значення вологовмісту суміші:

$$179 = 622 \frac{p_n}{100000 - p_n},$$

і отримуємо  $p_n = 22480 \text{ Па}$ .

Для  $t = 72 \text{ }^\circ\text{C}$  тиск насичення (рис.2.2) дорівнює  $p_n = 33940 \text{ Па}$ . Тоді з (2. 6) визначаємо ступінь насичення повітря  $\varphi = 0,66$ .

Щоб перевірити результат аналітичного рішення за  $Id$  –діаграмою знаходимо на ній дві точки, що характеризують стан повітря відповідно до завдання. Координати точки 1 –  $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $\varphi_1 = 0,7$ , координати точки 2 –  $t_2 = 92 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $\varphi_2 = 0,5$ . Проводим відрізок прямої, що з'єднує їх. Коефіцієнт пропорції суміші розраховано вище  $n = 2$ . Відповідно рекомендацій до рис.2.9 вимірюємо відстань між точками 1–2 і ділимо її на  $2+1$  рівних частини. Точка, що відповідає параметрам суміші повітря двох вищенаведених станів буде знаходитись ближче до точки 1, оскільки маса повітря у стані 1 є більшою. Отже температура та відносна вологість суміші повітря дорівнюють  $t_{\text{сум}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $\varphi_{\text{сум}} = 0,66$ .

**Задача 13.** До 20 кг повітря з параметрами  $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $\varphi = 30\%$ , що міститься у сушарці додали 5 кг сухої насиченої пари з тепловмістом  $i_n = 2900 \text{ кДж/кг}$ . Визначити параметри отриманої суміші аналітично та за  $Id$  –діаграмою.

Визначаємо параметри для повітря, що знаходиться у сушарці:

Заданій температурі відповідає тиск насичення водяної пари  $p_n=31157$  Па (рис.2.2).

Парціальний тиск визначають з рівняння (2.6) :

$$p_n = 31157 \times 0,3 = 9347 \text{ Па.}$$

Вологовміст визначають з рівняння (2.7):

$$d = 622 \times 9347 / (100000 - 9347) = 64 \text{ г(кг)}^{-1}.$$

Тепловміст визначають з рівняння (2.11):

$$I = 1,0 \times 70 + 0,064 \times (1,93 \times 70 + 2490) = 238 \text{ кДж(кг)}^{-1}.$$

Визначаємо коефіцієнт пропорції суміші за (2.15):

$$n = \frac{20}{5} = 4.$$

Параметри суміші обчислюють за (2.20) і (2.21):

$$\text{тепловміст } I_{\text{сум}} = 238 + \frac{2900}{4} = 975 \text{ кДж(кг)}^{-1},$$

$$\text{вологовміст } d_{\text{сум}} = 64 + \frac{1000}{4} = 314 \text{ г(кг)}^{-1}.$$

Щоб перевірити результат аналітичного рішення за  $Id$  –діаграмою використовуємо рекомендації до рис.2.10. Знаходимо положення точки 1, що відповідає стану повітря у сушарці –  $t=70^\circ\text{C}$  та  $\varphi=30\%$ . З початку координат проводимо пряму на кутову шкалу до значення  $i_n=2900$  ентальпії пари. Через точку 1 провести пряму, паралельну прямій  $0-i_n$ . За (2.21) визначено  $d_{\text{сум}} = 314 \text{ г(кг)}^{-1}$ . На перетині лінії вологовмісту суміші та прямої паралельної  $0-i_n$ , знаходиться точка, що відповідає параметрам суміші повітря і пари. Її координати  $d_{\text{сум}} = 314 \text{ г(кг)}^{-1}$ ;  $I = 970 \text{ кДж(кг)}^{-1}$ .

## 2.6. Контрольні запитання

1. Що таке агент сушіння?
2. Що відображає діаграма Ендрюса?
3. Яка пара називається насиченою?
4. Яка пара називається перегрітою?
5. Яку пару використовують при сушінні деревини?
6. Що таке ступінь насичення пари?

7. Чому дорівнює атмосферний тиск вологого повітря?
8. Що таке абсолютна вологість повітря?
9. Що таке вологомісткість насиченого повітря?
10. Що таке відносна вологість повітря?
11. Що таке вологовміст повітря?
12. Що таке тепловміст (ентальпія) повітря?
13. Як побудована діаграма вологого повітря?
14. Як побудована діаграма топкових газів?
15. Що таке точка роси і яка температура їй відповідає?
16. Що таке границя охолодження і яка температура їй відповідає?
17. Як побудовано психрометр?
18. Скількома і якими параметрами характеризують стан повітря?
19. За яким принципом відображаються процеси нагрівання і охолодження повітря на діаграмі?
20. За яким принципом відображаються процеси випаровування повітрям вологи на діаграмі?
21. За яким принципом відображаються на діаграмі процеси змішування повітря різних станів?
22. За яким принципом відображаються на діаграмі процеси змішування повітря і пари?

### 3. ТЕПЛОВЕ ОБРОБЛЕННЯ ДЕРЕВИНИ

#### 3.1. Способи нагрівання деревини

Гідротермічне оброблення деревини пов'язане із явищами переміщення теплоти та речовини (води і пари) в оброблюваному матеріалі та оточуючому його газоподібному або рідкому середовищі. Цим процесам дано загальну назву процесів або явищ тепломасоперенесення.

Нагрівання будь-якого тіла є наслідком теплообміну. Розрізняють три елементарних види теплообміну:

теплопровідність або кондукцію (переміщення тепла всередині тіла, що ґрунтується на взаємодії між собою молекул речовини);

конвекцію (переміщення теплоти, зв'язане із вільною або примусовою течією газу або рідини);

випромінювання або радіація (передача теплової енергії у вигляді електромагнітних хвиль).

Елементарні явища у чистому вигляді зустрічаються діже рідко. Практичні способи нагрівання, як правило засновані на складних явищах теплообміну.

У промисловості застосовуються такі основні способи нагрівання деревини:

Кондукційне (контактне) нагрівання – безпосереднє зіткнення деревини з нагрітими поверхнями, що супроводжується теплопровідністю та тепловим випромінюванням. Застосовується для двостороннього обігріву плоских широких сортиментів (щити, фанера тощо).

Конвекційне нагрівання у тепловому або газоподібному середовищі (пара, повітря, вода), ґрунтується на конвекції обробляючого середовища біля поверхні деревини та теплопровідності і супроводжується також тепловим випромінюванням. Найпоширенішими у промисловості є процеси саме конвекційного нагрівання.

Радіаційне нагрівання – опромінюванням деревини джерелами інфрачервоної радіації із довжиною хвиль 0,8-400 мкм, які розташовані від

матеріалу на деякій відстані. Основане на тепловому випромінюванні та супроводжується теплопровідністю і конвекцією. Застосовується переважно для сушіння опоряджених лаками та фарбами поверхонь деревини.

Діелектричне нагрівання у конденсаторі електричного коливального контуру високої частоти. Основане на взаємодії високочастотного електромагнітного поля з деревиною, протягом якого у деревині генерується тепло за рахунок діелектричних втрат. Інтенсивність нагрівання напряду залежить від частоти коливань, а також від діелектричних властивостей матеріалу. Використовується у сушарках з використанням струму високої частоти – СВЧ або надвисокої частоти – НВ .

### **3.2. Технологія та обладнання теплового оброблення деревини**

Способи теплового оброблення деревини поділяють за видами теплообміну та агентів обробки, які застосовуються з цією метою. На конвекційному теплообміні засноване теплове оброблення, що проводиться:

- 1) у відкритих басейнах у воді за температури не більше 20 °С;
- 2) водою у спеціальних варильних басейнах за температури 40 °С –90 °С – проварювання;
- 3) насиченою водяною парою – пропарювання.

Теплове оброблення у відкритих басейнах використовують переважно на лісопильних заводах, де проміжний запас деревини перед розпилюванням сортують і зберігають у воді. У зимовий період, коли деревина поступає у замороженому стані, її розморожують у спеціальних басейнах. Для цього необхідно забезпечити потрібну тривалість витримки у воді. За температури води у басейні  $t = 10\text{ °С} - 20\text{ °С}$  і вологості деревини  $W = 90\% - 100\%$  заболонна частина колод розморожується за 4 год – 10 год залежно від діаметру деревини.

Проварювання деревини застосовується у фанерній промисловості для оброблення оцупків або кряжів перед луценням. Мета операції – підвищення

пластичних властивостей деревини для полегшення процесу різання і забезпечити гарної якості шпону.

Лущення холодних або мерзлих оцупків дає нерівну шорстку рифлену поверхню із тріщинками на зворотному боці, а перегрітих - ворсисто, розмачулену. Для отримання поверхні шпона відповідної якості необхідно підтримувати температуру деревини в означеному оптимальному діапазоні. Цей діапазон становить: для вільхи і берези 30 °С – 40 °С, м'яких хвойних порід 35°С – 45 °С, модрина 40°С – 60°С.

Пропарювання деревини може проводитися за допомогою м'яких та жорстких режимів. Під час реалізації м'яких режимів застосовують воду температурою 35°С – 45 °С , тому час оброблення є досить тривалим і може становити 4 – 5 діб для сировини діаметром 40 – 60 мм. За цей час деревина відтає по всьому обсягу і прогрівається до температури близької до температури середовища. Важливою перевагою м'яких режимів є досягнення рівномірної температури по обсягу сортименту та висока якість шпону. Їх недолік – велика тривалість процесу, необхідність великих виробничих площ.

Жорсткі режими передбачають використання високої температури води –  $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C} - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  і у 5 – 6 разів меншу тривалість оброблення для розморожування і доведення температури на поверхні осердя (олівця) до  $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Оскільки поверхня сортиментів (кряжів, чурпаків) набуває температури гарячої води, яка є значно вищою за оптимальну температуру лущення, то їх витримують у приміщення після вивантаження із басейну. Протягом витримки температура на поверхні знижується, а в центрі підвищується, проте її розподіл є нерівномірним. Переваги жорстких режимів полягають у тому, що термін оброблення їх малим і, відповідно, використовується менша площа для обладнання. Недолік – нерівномірність температури по обсягу сортименту і низька якість шпону.

Проварювання проводять у варильних басейнах різних конструкцій, у які деревина консольно-козловим краном у проварювальні ями (рис.3.1). Ями

накривають кришками для запобігання спливання деревини та збереження тепла. Нагрівання води в басейні відбувається шляхом впуску пари безпосередньо в воду крізь труби з отворами. Таким чином тепловміст пари використовується майже повністю. Температуру води регулюють кількістю пари.



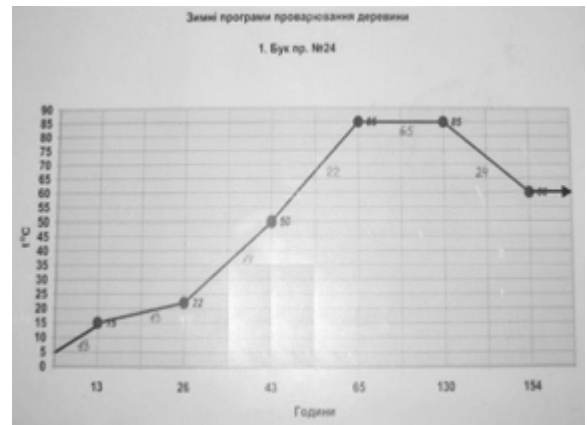
Рисунок 3.1. Облаштування варильного басейну ТОВ «ОДЕК» [21]

Цікаво, що на підприємстві ТОВ «УкрШпон» для виготовлення струганого шпону цінних листяних порід як-то з буку, дубу, клену, ясеня, черешні, вільхи тощо використовують також проварювання ванчосів – рис.3.2.

Пропаювання застосовують у виробництві сірників, струганого шпону та у виготовленні виробів з деревини (оброблення заготовок перед гнуттям або пресуванням). Процес здійснюється у середовищі насиченої пари, забезпечуючи збереження вологості деревини.



а



б

Рисунок 3.2. Розміщення букових ванчосів у варильному басейні ТОВ «УкрШпон» (а) та режим їх оброблення (б) [22]

Під час виробництва сірників з осики високої якості шпона можна досягти за будь-якої позитивної температури. Тому пропарювання проводять лише у зимовий період для інтенсифікації процесу. Оброблення переважно проводять у парильних ямах за конструкцією дещо схожих на контейнерні басейни для проварювання оцупків. Після завантаження в яму подають пару температурою  $t = 95\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  і витримують оцупки для відтавання до діаметру  $d = 12\text{ см}$ , потім подачу пари припиняють і витримують сировину деякий час за температури, яка постійно знижується, що дозволяє продовжити відтаювання глибше до діаметру  $d = 8\text{ см}$  за рахунок акумульованої теплоти.

Параметри режиму обробки, а саме температуру і тривалість можна розрахувати залежно від діаметру оцупків, вирішуючи задачу нагрівання деревини з одночасним розморожуванням. Якщо організація процесу не передбачає сортування сировини за діаметрами, термін обробки необхідно призначати для найбільшого за розмірами матеріалу. Наприклад, для осики діаметром  $d = 350\text{ мм}$  і вологістю  $W = 110\%$  теоретичний термін відтавання становить 4 години, а витримування – 6 год.

Для виробництва струганого шпона ванчоси можуть пластифікувати у парильних пристроях, але у зв'язку зі значними термінами обробки – 20–30 год, почали використовувати парильні автоклави – рис.3.3.



Рисунок 3.3. Автоклав для пропарювання ванчосів

Автоклави виготовляють діаметром 2,4 м, довжиною 5-18 м і місткістю 3-20 м<sup>3</sup> деревини. Оброблення проходить під тиском близько 0,3 МПа і температури насиченої пари  $t_n=130^{\circ}\text{C}$ . Пара рівномірно роздається по всій довжині автоклаву за допомогою розподільної труби з отворами. Кришка автоклаву герметично притискається до корпусу і закривається за допомогою гідроциліндрів. Автоклав оснащений трубкою для відводу конденсату, запобіжним клапаном та штуцерами для давачів температури і тиску.

Оптимальні температури,  $^{\circ}\text{C}$ , ванчосів при струганні обумовлені якістю шпона і залежно від порід становлять:

дуб, ясен, ільм, в'яз	40-50
бук, горіх, клен, береза, червоне дерево	45-50
модрина	70-75 .

Для отримання потрібної температури необхідно призначати різний термін пропарювання. Залежно від розмірів ванчосів, породи, початкової температури він може значно коливатися від 3–4 год до 50–60 год. Щоб зменшити витрати теплоти на пропарювання використовують триступеневі режими [23]. Протягом першого ступеню реалізують циклічне нагрівання шляхом подачі насиченої пари і доведення сортименту до температури  $T_1$ , після чого подачу пари припиняють і відновлюють після утворення конденсату за температури  $T_2$  (рис.3.4). Протягом другого ступеню пропарювання відбувається температуру насиченої пари знижують до рівня  $T_3$ ,

під час третього ступеню прогрівання відбувається за температури  $T_4=100\text{ }^\circ\text{C}$  і це дозволяє після завершення процесу безпечно відкриття автоклаву.

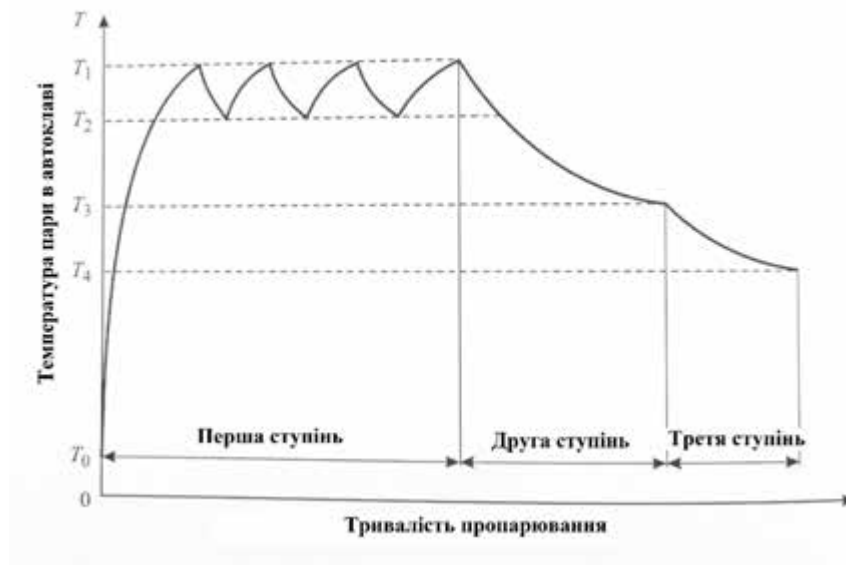


Рисунок 3.4. Триступеневий режим пропарювання деревини у автоклаві [23]

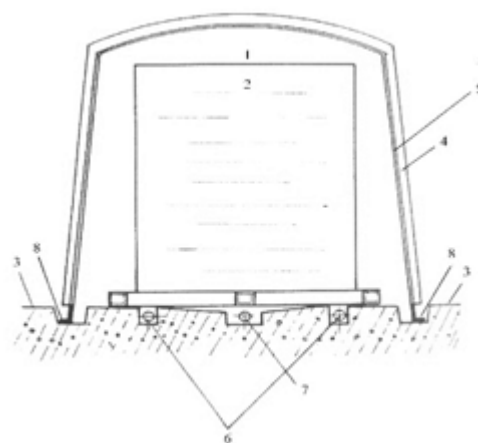
Після вивантаження з автоклава для вирівнювання температури перед стругання ванчоси необхідно витримати 2–3 год у приміщенні цеху для вирівнювання температури.

Автоклавне пропарювання ванчосів має суттєвий недолік —внаслідок впливу значної температури у поверхневих шарах ванчосів спостерігається зниження міцності та потемніння деревини, що знижує декоративні властивості шпона. Це особливо помітно на деревині екзотичних порід. Для запобігання такого ефекту необхідно проводити оброблення під тиском, близьким до атмосферного, або ж у парильних ямах чи камерах. Останні за конструкцією споруд схожі на сушарки для пиломатеріалів, але повинні бути герметичними.

У технології виготовлення виробів з деревини для пропарювання заготовок перед гнуттям, для знезараження та вирівнювання кольору деяких порід деревини використовують спеціальні парильні камери, схожі за конструкцією на конвекційні сушарки — рис. 3.5а або ж так звані «парильні ковпаки» — рис. 3.5б.



а



б

Рисунок 3.5. Парильна камери: а – фірми Mühlböck-Vanisek [24] ; б – схема «парильного ковпаку»: 1–простір ; 2 – пропарюваний матеріал; 3 – підлога з бетону; 4,5–огородження із пароізоляцією; 6–перфоровані труби для подачі пари; 7–відведення конденсату; 8–водний затвор [23]

Основна порода деревини, для якої використовують процедуру пропарювання – бук. Це пов'язано з тим, що колоди бука часто мають таку ваду як несправжнє ядро, яке різко відрізняється за кольором від заболонної частини. Несправжнє ядро має червоно-бурий колір, а заболонь – світло бежевий. Бук відносять з цінних порід деревини, він має красиву текстуру і часто використовується у меблевій промисловості.

Для пропарювання деревини бука використовують одноступеневий режим із застосуванням температури насиченого повітря 80 – 95 °С (рис.3.6).

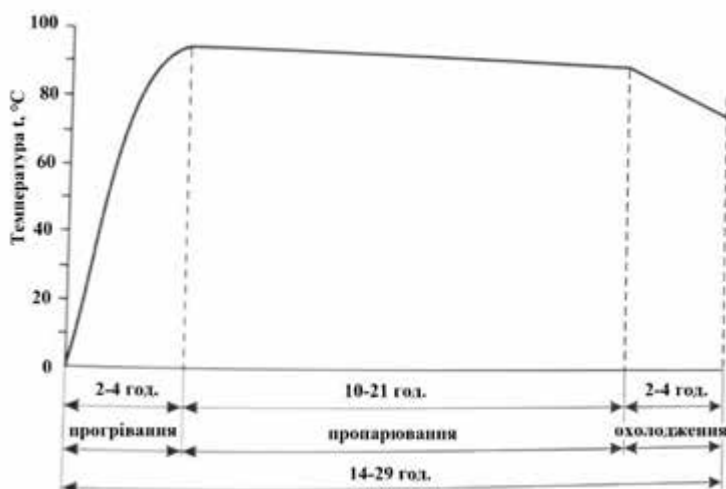


Рисунок 3.6. Режим пропарювання пилопродукції з деревини бука товщиною 20÷40 мм у «парильного ковпаку» [23]

Завдяки термохімічній реакції у процесі пропарювання колір букових дошок може змінюватися від блідо-рожевого до темно-коричневого, що дає можливість виробляти широкий асортимент готової продукції з багатою палітрою кольорів і красивою текстурою, притаманної багатьом твердолистяним породам. Крім бука в ряді європейських країн пропарюють ялина (для отримання більш темного кольору), дуб і акацію.

Незважаючи на простоту конструкцій парильних камер, необхідно щоб вони мали герметичність огорожень, забезпечували хорошу теплоізоляцію, яка гарантує відсутність конденсації вологи на внутрішніх частинах огорожень. У камері повинна бути передбачена природна циркуляція насиченої пари та правильна конструкція для вихлопу водяної пари

### **3.3. Фізичні закономірності і розрахунок процесів конвекційного нагрівання деревини**

Процес конвекційного нагрівання визначається двома фізичними явищами – теплопровідністю матеріалу і теплообміном його із середовищем. Інтенсивність переміщення теплоти в матеріалі за рахунок теплопровідності характеризується рівнянням [14]:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (3.1)$$

де  $q$  – щільність теплового потоку (кількість теплоти, що проходить за одиницю часу через одиницю площі  $e$  заданому перерізі тіла, Вт(м<sup>2</sup>)<sup>-1</sup>;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт(м °С)<sup>-1</sup> ;

$t$  – температура, °С;

$x$  – координата точки тіла, м.

Величину  $\frac{dt}{dx}$  – називають температурним градієнтом. Знак “–” показує, що напрям температурного градієнту, який спрямований у бік підвищення температури, у випадку конвекційного нагрівання є оберненим до напрямку потоку теплоти.

Інтенсивність конвекційного теплообміну на межі між твердим тілом і рідиною або газом визначають за рівнянням Ньютона [14]:

$$q = \alpha(t_c - t_{\text{пов}}), \quad (3.2)$$

де  $t_c$  – температура рідкого або газоподібного середовища;

$t_{\text{пов}}$  – температура поверхні тіла;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  $\text{Вт}(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})^{-1}$ , який залежить від умов конвекції (вільної без спонукання або вимушеної). Для процесів нагрівання та охолодження деревини коефіцієнт теплообміну обчислюється за відповідними формулами [24]:

у разі природної конвекції

$$\alpha = 1,4\left(\frac{\Delta t}{S}\right)^{0,25}, \quad (3.3)$$

підчас примусової конвекції

$$\alpha = 3,6\frac{(\rho\omega)^{0,6}}{S^{0,4}}, \quad (3.4)$$

де  $\Delta t = t_c - t_{\text{пов}}$  ;

$S$  – товщина стінки, м;

$\omega$  – швидкість циркуляції повітря,  $\text{м}(\text{с})^{-1}$ ;

$\rho$  – густина оточуючого повітря,  $\text{кг}(\text{м}^3)^{-1}$ .

На практиці зустрічаються переважно два види складного теплообміну: стаціонарний і нестаціонарний.

Стаціонарний теплообмін характеризується постійним у часі температурним полем. Прикладом його може бути передача теплоти через стінку (рис.3.7).

Кількість теплоти для одношарової стінки (рис.3.7а) визначають за рівнянням 3.5:

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} (t_1 - t_2) = K(t_1 - t_2), \quad (3.5)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнту теплообміну на протилежних стінках;  $\lambda$  – теплопровідність матеріалу стінки;  $S$  – товщина стінки,  $t_1, t_2$  – температури на протилежних стінках;  $K$  – коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})^{-1}$ .

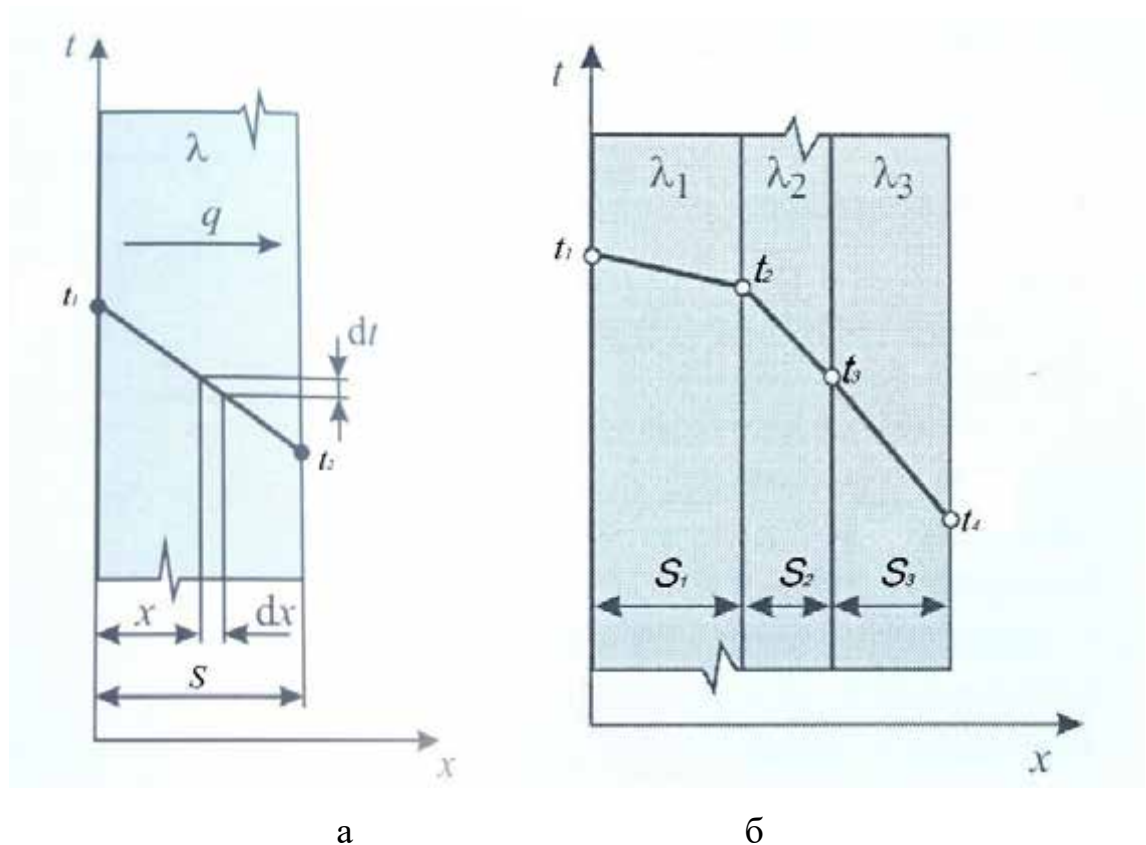


Рисунок 3.7. Ілюстрація стаціонарного теплообміну: а – одношарова стінка; б – багатшарова стінка [23]

Для визначення кількості теплоти для багатшарової стінки (рис.3.7б) у рівняння (3.3) вводять товщини та коефіцієнти теплопровідності кожного шару стінки:

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2}} (t_1 - t_2) = K(t_1 - t_2), \quad (3.6)$$

Рівняння (3.5) та (3.6) використовують для визначення тепловтрат будівель і споруд в оточуюче середовище, а також для розрахунків теплообмінних пристроїв.

Нестаціонарний теплообмін характеризується змінним температурним полем у часі і просторі. Прикладом нестаціонарного теплообміну може бути нагрівання деревини у середовищі (вода, пара тощо), коли початкова температура матеріалу є нижчою за температуру середовища.

Зміна температури довільної точки за нестаціонарного теплообміну визначається диференціальним рівнянням Фур'є:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (3.7)$$

де  $\tau$  – тривалість нагрівання;  $\rho$  – щільність тіла;  $c$  – питома теплоємність тіла;  $x, y, z$  – координати заданої точки.

Для одновимірних тіл, тобто тіл форма і розмір яких визначаються тільки одним лінійним вимірником ( до них відносяться необмежена пластина, циліндр, куля), потік тепла спрямований у один бік (наприклад,  $x$ ):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right), \quad (3.8)$$

де  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2(\text{с})^{-1}$ , який є важливішим фізичним параметром матеріалу, що характеризує його теплоінерційність, тобто швидкість змінювання температури.

Диференціальне рівняння Фур'є для нестационарного теплообміну виведено на основі загальних законів фізики і описує явища у самому загальному вигляді. Існує велика кількість процесів тепловіддачі, які описуються тим же рівнянням, але відрізняються деякими особливостями. Щоб виділити процес, що розглядається та описати його математично однозначно, необхідно додати математичне описання усіх окремих особливостей, які називаються умовами однозначності або крайовими умовами. Вони складаються з:

- геометричних умов, що характеризують форму і розміри тіла, в яких протікає процес. ( у нашому випадку це необмежений циліндр – чурбак, кряж ванчос; необмежена пластина – пиломатеріал; необмежений паралелепіпед – брус);

- фізичних умов, що характеризують фізичні властивості середовища і тіла ( у даному випадку це вологість, щільність, питома теплоємність та теплопровідність деревини, температура обробляючого середовища);

- часових умов, що характеризують особливості протікання процесу протягом часу;

- граничних умов, що характеризують особливості протікання процесу на границі тіла і обробляючого середовища.

Якщо прогрівання деревини проходитиме у нагрітому повітрі, тоді граничні умови матимуть такий вигляд:

$$-\lambda \frac{dt}{dx} = \alpha(t_c - t_{\text{пов}}), \quad (3.9)$$

тобто вони встановлюють, що кількість теплоти, що переноситься у одиницю часу за рахунок теплопровідності з поверхні тіла в середину, дорівнює кількості теплоти, яку сприймає за цей час поверхня з оточуючого середовища.

У разі нагрівання сортиментів у насиченій парі або воді спостерігається досить інтенсивним теплообміном, тоді перепад температури між поверхнею тіла та обробляючим середовищем буде малим і гранична умова (3.9) може бути замінена такою умовою:

$$t_c \approx t_{\text{пов}}. \quad (3.10)$$

Аналітичний вираз функції (3.8) є дуже складним і має вигляд нескінченного ряду. Для розв'язування практичних задач використовують графоаналітичний метод з використанням критеріїв подібності і спеціальних номограм. Критерії подібності являють собою безрозмірні комплекси фізичних величин, що характеризують певне явище. Застосовуються вони, як і теорія подібності, для математичного аналізу експериментальних даних. Для конвекційного теплообміну визначальними критеріями подібності є критерії Фур'є ( $Fo$ ) і Біо ( $Bi$ ) :

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2}, \quad (3.11)$$

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}, \quad (3.12)$$

де  $R$  – визначальний розмір тіла, м, за який для одновимірних тіл приймають радіус (циліндр, куля) або половину товщини (пластина).

Тоді рішення рівняння (3.8) для граничної умови (3.9) матиме вигляд:

$$\theta = f\left(\frac{x}{R}, Fo, Bi\right), \quad (3.13)$$

де  $\theta$  – безрозмірна температура довільної точки тіла;

$x$  – координата цієї точки, а саме відстань від поверхні тіла;

$x/R$  – безрозмірна координата.

Безрозмірну температуру можна визначити через змінну температуру заданої точки,  $t_x, ^\circ\text{C}$ , температуру середовища,  $t_c, ^\circ\text{C}$  і початкову температуру деревини,  $t_0, ^\circ\text{C}$  за співвідношенням:

$$\theta = \frac{(t_c - t_x)}{(t_c - t_0)}. \quad (3.14)$$

Числові значення критеріїв Фур'є та Біо можуть змінюватися у межах від 0 до  $\infty$ , а значення безрозмірної температури і безрозмірної координати можуть змінюватися від 0 до 1.

У разі вирішення задач проварювання і пропарювання деревних сортиментів рішення рівняння (3.8) за умови (3.10) буде мати вигляд:

$$\theta = f\left(\frac{x}{R}, F_0\right). \quad (3.15)$$

Графічне рішення (3.15) для необмеженої пластини та необмежено циліндру наведені у вигляді номограм – рис.3.8.

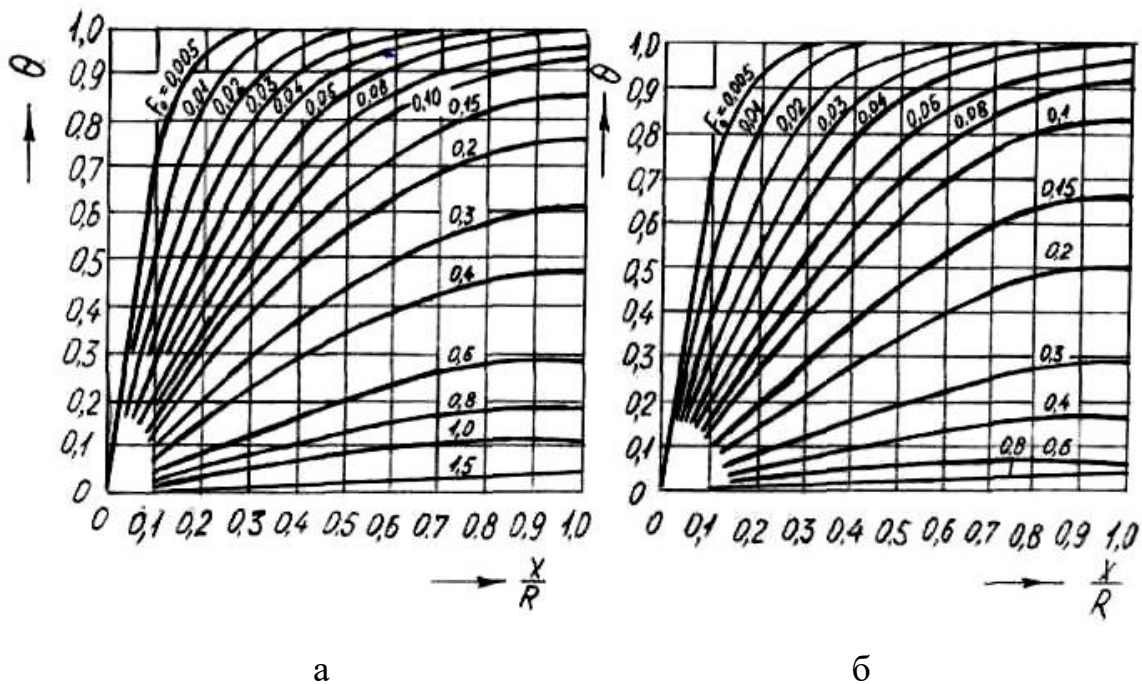


Рисунок 3.8. Номограма взаємозв'язку критерію Фур'є, безрозмірної температури і безрозмірної координати необмеженої пластини (а) і необмеженого циліндру (б) у разі нагрівання у рідині або насиченій парі [14]

На виробництві, зазвичай, вирішують дві протилежні задачі:

- визначення терміну витримування деревини у гарячій воді або парі до досягнення на заданій відстані від поверхні певної температури;
- визначення температури тієї або іншої точки тіла за заданого терміні нагрівання.

Для вирішення першої задачі повинні бути відомими необхідна температура після оброблення на заданій відстані від поверхні, тобто  $t_x, ^\circ\text{C}$ , визначальний розмір сортименту –  $R$ , м, початкова температура деревини –  $t_0, ^\circ\text{C}$ , температура обробляючого середовища –  $t_c, ^\circ\text{C}$ , вологість деревини –  $W, \%$  та порода. Перш за все визначають безрозмірну координату  $x/R$ , потім за (3.14) безрозмірну температуру і за рис.3.6 на перехресті значень  $x/R$  та  $\theta$  визначають значення критерію Фур'є. Використовуючи пояснення до рівняння (3.8) та графіки на рис.1.27-1.29 підраховують значення коефіцієнту температуропровідності  $a, \text{м}^2(\text{с})^{-1}$ . Далі розраховують термін оброблення, с, за:

$$\tau = \frac{F_0 R^2}{a} . \quad (3.16)$$

Вирішення зворотної задачі потребує спочатку розрахунку критерію Фур'є за відомого терміну оброблення та за визначення за номограмою (рис.3.6) для відповідної координати точки тіла безрозмірної температури. Шукану температуру деревини визначають за:

$$t_x = t_c - \theta(t_c - t_0). \quad (3.17)$$

Промислові сортименти зазвичай мають за перетином круглу або прямокутну форму. У круглих сортиментів (колод, кряжів, оцупків, ванчосів) довжина є значно більшою за діаметр, тому при нагріванні їх можна без великої похибки вважати необмеженими циліндрами. Прямокутні сортименти (дошки, бруски) можна приймати за необмежені пластини за умови співвідношення товщини до ширини буде меншим за  $0,3 - S_{\tau}/S_{\text{ш}} < 0,3$ .

Якщо співвідношення товщини бруса до ширини більше або дорівнює  $0,3 - S_{\tau}/S_{\text{ш}} \geq 0,3$ , сортимент слід розглядати як паралелепіпед необмеженої довжини, який утворено перетином двох пластин товщинами, що чисельно

відповідають товщині та ширині бруса. Загальна безрозмірна температура у певній точці такого паралелепіпеду дорівнює добутку безрозмірних температур, які б були у цій точці, якщо б окремо нагрівали ці дві пластини:

$$\theta_{\text{парал}} = \theta_{\text{т}} \cdot \theta_{\text{ш}} \quad (3.18)$$

Якщо за умовою задачі необхідно визначити термін нагрівання прямокутного сортименту до заданої температури на його центральній вісі, необхідно спочатку розрахувати її для пластини меншого розміру сортименту (зазвичай товщини  $-\tau_{s1}$ ), а потім помножити цю величину на коефіцієнт  $c_{\tau}$ , що вносить поправку на реальну форму тіла:

$$\tau_{\text{парал}} = \tau_{s1} \cdot c_{\tau} \quad (3.19)$$

Коефіцієнт  $c_{\tau}$  знаходять із діаграми, наведеної на рис. 3.9.

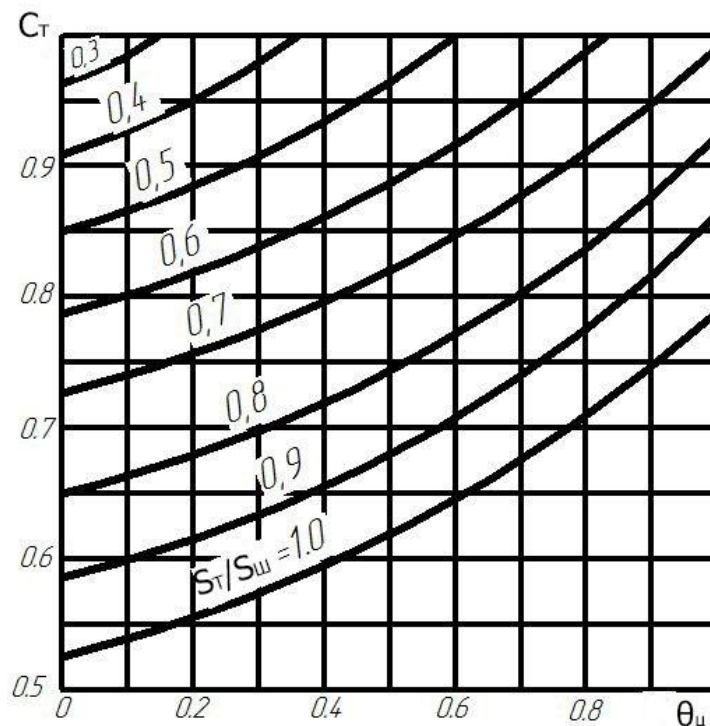


Рисунок 3.9. Діаграма коефіцієнта  $C_{\tau}$  залежно від відношення поперечних розмірів сортименту  $S_{\text{т}}/S_{\text{ш}}$  і безрозмірної температури  $\theta_{\text{ц}}$  на його центральній вісі [25]

Під час проектування пристроїв для теплової обробки деревини необхідно визначити витрати теплоти на її нагрівання. Для цього розраховують середню інтегральну температуру оброблюваних сортиментів

наприкінці процесу, яка у загальному виді характеризується для одновимірного тіла функцією:

$$\bar{\theta} = f(F_0), \quad (3.20)$$

графіки якої наведені на рис.3.10 для необмеженої пластини і циліндру.

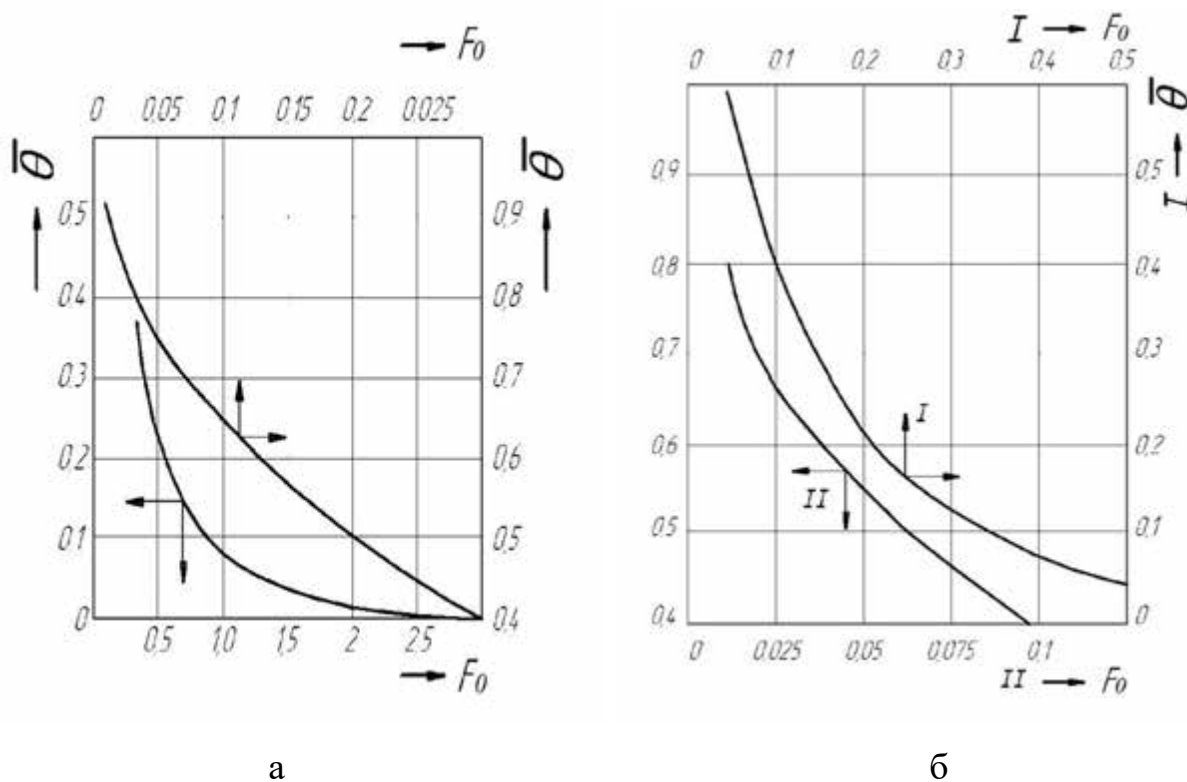


Рисунок 3.10. Графік середньої безрозмірної температури  $\bar{\theta}$  необмеженої пластини (а) та необмеженого циліндру (б) при нагріванні у рідині або насиченій парі [14]

Середню температуру сортименту залежно від отриманих значень середньої безрозмірної температури  $\bar{\theta}$  та температури обробляючого середовища  $t_c$ , °С і початкової температури деревини  $t_0$ , °С визначають за (3.17).

### 3.4. Розрахунок процесів конвекційного нагрівання замерзлої деревини

Процеси нагрівання деревини можуть супроводжуватися переміщенням вологи у матеріалі та зміною її агрегатного стану. Якщо деревина зберігається у атмосферних умовах за від'ємної температури, вода у ній частково ( вільна –

повністю, а зв'язана – частково) знаходиться у стані льоду. У разі нагрівання замороженої деревини відбувається віддавання сирі деревини і процес принципово відрізняється від нагрівання у діапазоні позитивних температур.

У процесі розморожування температура будь-якої точки тіла підвищується від від'ємної величини до нуля. Потім вона залишається постійною – близькою до 0 – рис.3.11. Протягом цього часу вода у зовнішній зоні перетворюється із твердого стану у рідкий. Наприкінці процесу температура знову починає підвищуватися, прямуючи до температури оточуючого середовища (при нагріванні у воді та насиченій парі) або до температури границі охолодження (при нагріванні тільки у повітрі).

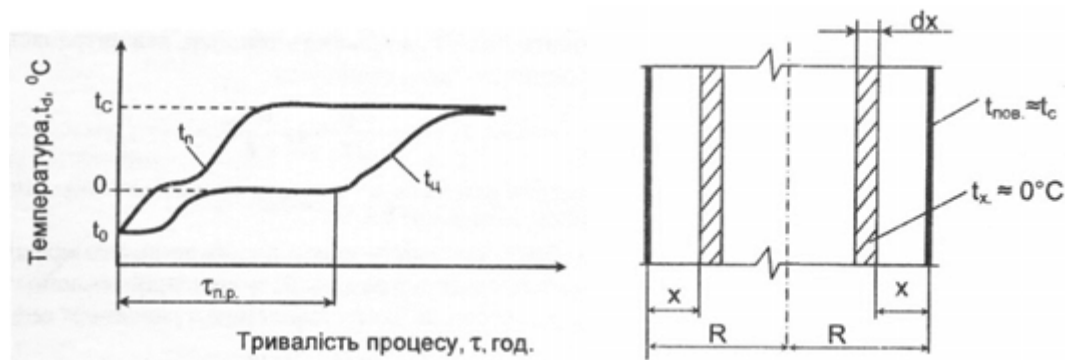


Рисунок 3.11. Схема переміщення границі відтавання у пластині [26]

Для практичних цілей важливо вміти вирішувати дві основні задачі:

- визначати час, необхідний для розморожування сортименту на потрібну глибину;
- визначати час, необхідний для доведення будь-якої точки сортименту до заданої позитивної температури після його повного розморожування по всьому перетині.

Для вирішення першої задачі для одновимірного тіла уявимо, що заморожена деревина, наприклад, пластинка оточена нагрітою рідиною або насиченою паром постійної температури  $t_c$ . Завдяки великій інтенсивності теплообміну поверхневий шар пластинки дуже швидко розморозиться і набуде температури  $t_c$ . На деякому етапі процесу поверхнева зона пластинки товщиною  $x$  вже розморозиться, а внутрішня зона залишиться ще у замороженому стані. Зрозуміло, що температура всієї замороженої зони дорівнює 0, а температура

розмороженої зони змінюється за її товщиною від 0 на границі розморожування до  $t_c$  на поверхні. Будемо вважатимемо характер цієї зміни прямолінійним.

Протягом нескінченно малого відрізка часу  $d\tau$  границя розморожування переміститься до центральної площини пластини на величину  $dx$ . При цьому об'єм деревини, що розморозився за одиницю часу, з врахуванням площини пластини  $F$  складатиме  $F dx/d\tau$ , а кількість витраченого на розморожування в одиницю часу тепла становитиме:

$$\frac{dQ}{d\tau} = q_p \frac{dx}{d\tau} F, \quad (3.21)$$

де  $q_p$  – питома витрата теплоти на розморожування одиниці об'єму матеріалу, Дж  $(\text{м}^3)^{-1}$ :

$$q_p = \rho \cdot c_{(-)} \cdot (-t_0) + \rho_6 \cdot \gamma \left( \frac{W - W_{з.п.}}{100} \right), \quad (3.22)$$

де  $\rho$  – щільність деревини за відповідної вологості,  $\text{кг}(\text{м}^3)^{-1}$ ;  $c_{(-)}$  – питома теплоємність мерзлої деревини,  $\text{кДж}(\text{кг} \text{ } ^\circ\text{C})^{-1}$ ;  $\gamma$  – прихована теплота плавлення льоду (335  $\text{кДж}/\text{кг}$ );  $W$  – вологість деревини, %;  $W_{з.п.}$  – відносний вміст зв'язаної води, яка залишилася у мерзлій деревини у рідкому стані, %.

Величина  $W_{з.п.}$  залежить від температури  $t$  і визначається за табл.3.1.

Таблиця 3.1. Відносний вміст незамерзлої зв'язаної вологи у деревині [27]

$t, ^\circ\text{C}$	-50	-40	-30	-25	-20	-15	-10	-5
$W_{з.п.}, \%$	12	14	15	17	18	20	23	27

Швидкість переміщення зони розморожування лімітується щільністю теплового потоку, обумовленого теплопровідністю,  $\lambda$ ,  $\text{Вт}(\text{м} \text{ } ^\circ\text{C})^{-1}$ , зовнішньої зони сортименту:

$$\frac{dQ}{d\tau} = -\lambda \frac{dt}{dx} F = -\lambda \frac{-(t_u - t_c)}{x} F. \quad (3.23)$$

Прирівнявши (3.21) і (3.23), а також враховуючи, що температура у центрі сортименту дорівнює 0,  $t_u = 0$ , отримаємо диференціальне рівняння:

$$q_p \frac{dx}{d\tau} = \lambda \frac{t_c}{x}, \quad (3.24)$$

після інтегрування якого у межах товщини розмерзлої зони (від  $0$  до  $x$ ) можна отримати рівняння для визначення тривалості віддавання пластини,  $s$ , на задану глибину  $x$ :

$$\tau = x^2 \cdot \frac{q_p}{2\lambda t_c}. \quad (3.25)$$

Для визначення терміну повного розморожування пластини,  $\tau_{п.р.}$ ,  $s$ , товщиною  $S=2R$ , м, використовують наступне рівняння:

$$\tau_{п.р.} = R^2 \cdot \frac{q_p}{2\lambda t_c} = S^2 \cdot \frac{q_p}{4\lambda t_c}. \quad (3.26)$$

Для необмеженого паралелепіпеду, тобто бруса перетином  $S_m$  x  $S_{ш}$  термін повного розморожування визначається за:

$$\tau_{п.р.бр.} = S_T^2 \cdot \frac{q_p}{4\lambda t_c} c_\tau, \quad (3.27)$$

де  $c_\tau$  – поправковий коефіцієнт на реальну форму сортименту, який визначається з діаграми на рис.3.7.

Для циліндричних сортиментів (колод, оцупків, чурбаків, ванчосів) термін розморожування,  $s$ , на певну глибину розраховують за :

$$\tau = \Phi \cdot \frac{q_p}{\lambda t_c}, \quad (3.28)$$

де  $\Phi$  – критерій глибини розморожування,  $m^2$ , визначається за номограмою (рис.3.12) залежно від діаметру сортименту,  $D$ , см, та діаметру віддавання,  $d$ , см.

Термін повного розморожування круглих сортиментів,  $s$ , при  $d=0$  визначають за:

$$\tau_{п.р.} = D^2 \cdot \frac{q_p}{16\lambda t_c}. \quad (3.29)$$

Для вирішення другої практичної задачі – визначення терміну доведення температури у будь-якій зоні сортименту до необхідної позитивної величини після повного його розморожування не можна використовувати номограми, наведені на рис. 3.8. Це пов'язано з тим, що ці номограми побудовані для рівномірного розподілення температури за об'ємом сортименту, а після завершення розморожування цієї умови не можливо дотриматись. Отже, для

визначення додаткового часу  $\tau_{\text{дод.}}$ , с, для доведення температури на колі  $d$  до заданої температури  $t$  у циліндричних сортиментів використовують формулу:

$$\tau_{\text{дод.}} = \frac{0,096D^2}{a} \lg \left[ \frac{t_c}{t_c - t} \cdot \left( 1 - \frac{d}{D} \right) \right], \quad (3.30)$$

де  $a$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{м}^2(\text{с})^{-1}$ .

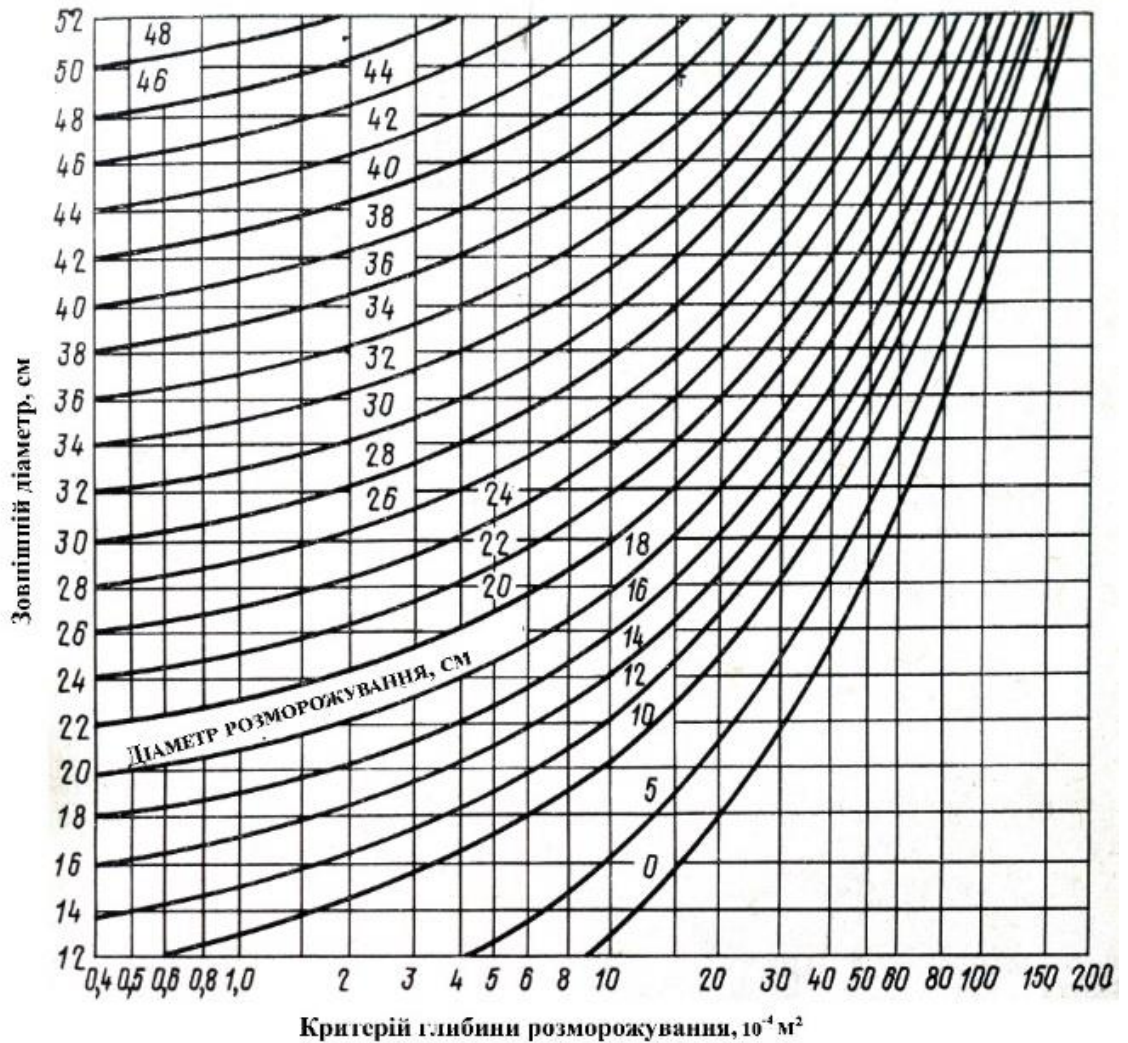


Рисунок 3.12. Номограма критерію глибини відтавання круглих сортиментів [14]

У окремих випадках результат розрахунку додаткового часу може бути від'ємним. Це означає, що за заданих  $D$  і  $t_c$  температура  $t$  у точці з координатою  $d$  досягається протягом розморожування і призначати додатковий час не потрібно.

### 3.5 Розрахунок продуктивності пристроїв для теплового оброблення деревини

Для розрахунку площі басейну для розморожування колод перед розпилюванням на лісопильних підприємствах необхідно знати кількість колод  $n$ , що проходять через басейн за зміну, їх середній діаметр,  $D$ , і довжину,  $L$ . Тоді площу басейну,  $F$ , м<sup>2</sup>, визначають за формулою:

$$F = \frac{DLn}{\beta}, \quad (3.31)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт заповнення басейну  $\beta = 0,45 \dots 0,55$ .

Розміри басейну для проварювання оцупків, чурбаків перед луценням лімітуються кількістю секцій, довжина яких визначається довжиною кряжів та типом завантажувального крану. Кількість секцій  $m$  визначається необхідним річним обсягом матеріалу  $V$ , м<sup>3</sup>, який має бути проварений у секції продуктивністю  $\Pi$ , м<sup>3</sup>, за певний час  $T$ , год.:

$$m = \frac{V}{\Pi T}, \quad (3.32)$$

У свою чергу продуктивність  $\Pi$ , м<sup>3</sup>, секції залежить від місткості  $E$ , тобто габаритних розмірів  $B$ ,  $h$ ,  $L$  з урахуванням коефіцієнта заповнення кряжами  $\beta$ , тривалості обробки  $\tau_1$  та тривалості завантаження  $\tau_2$ , год.:

$$\Pi = E \frac{T}{\tau_1 + \tau_2} = B \cdot h \cdot L \cdot \beta \frac{T}{\tau_1 + \tau_2}. \quad (3.33)$$

Термін завантаження і розвантаження розраховується з умови рівномірного подання сировини в луцильний цех.

Продуктивність  $\Pi$ , м<sup>3</sup> (год)<sup>-1</sup>, однієї парильної ями перед струганням шпону визначається за певний період  $T$ , год., залежно від терміну обробки  $\tau$ , год., розмірів ями ( $L$ –довжина, м,  $h$ –висота, м), довжини ванчосів,  $l$ , м та коефіцієнту заповнення ними  $\beta$  агрегату:

$$\Pi = \frac{T}{\tau} \cdot L \cdot h \cdot l \cdot \beta. \quad (3.34)$$

Якщо організація процесу не передбачає сортування сировини за діаметрами, термін обробки необхідно призначати для найбільшого за розмірами матеріалу. Наприклад, для осики діаметром  $d = 350$  мм і вологістю

$W = 110\%$  теоретичний термін відтавання становить 4 години, а витримування – 6 год.

Продуктивність парильного автоклаву розраховують аналогічно продуктивності парильної ями, змінивши у формулі (3.34) висоту ями  $h$ , на діаметр барабану  $D$ .

### 3.6. Приклади рішення задач

**Задача 1.** Букові кряжи діаметром 30 см, вологістю 55 % і початковою температурою 15 °С нагріваються у воді при  $t_c = 70$  °С. Визначити термін витримування, що необхідний для отримання всередині кряжа на колі уявного циліндра діаметром 10 см температури 40 °С.

Розраховуємо величину безрозмірної координати точок на цьому колі :

$$x/R = (15-5)/15 = 0,67.$$

Безрозмірна температура на уявному колі наприкінці процесу повинна становити:  $\theta = (70-40)/(70-15) = 0,545$ .

Знаходимо за номограмою (рис.3.8) для  $x/R = 0,67$  і  $\theta = 0,545$  величину критерію Фур'є  $F_0 = 0,16$ . Термін нагрівання визначається за формулою (3.16), у яку входить коефіцієнт теплопровідності:  $a = \lambda/c\rho$ . Деревина бука має базову щільність  $\rho_0 = 530$  кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>. Фактичну її щільність при вологості 55% знаходять за рис.1.27 –  $\rho = 820$  кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>. Для визначення  $\lambda$  і  $c$  необхідно знати середню розрахункову температуру, що дорівнює :  $(t_0 + t_c)/2 = (15 + 70)/2 = 43$  °С. Питому теплоємність за вологості 55% знаходять за діаграмою (рис. 1.28)  $c = 2,85$  кДж (кг °С)<sup>-1</sup>. Коефіцієнт теплопровідності знаходять за діаграмою (рис.1.29) і формулою (1.11) :  $\lambda = 0,36 \cdot 1,07 \cdot 1 = 0,385$  Вт(м °С)<sup>-1</sup> або Дж(кг °С)<sup>-1</sup>. Тоді коефіцієнт теплопровідності:  $a = 0,385 / (2,85 \cdot 10^3 \cdot 820) = 1,65 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>(с)<sup>-1</sup>. Термін нагрівання за формулою (3.16) :  $\tau = (0,16 \cdot 0,0225) / 1,65 \cdot 10^{-7} = 21800$  с = 6,1 год.

**Задача 2.** Для умов Задачі 1 розрахувати середню інтегральну температуру кряжа наприкінці нагрівання.

За графіком на рис.3.10 знаходимо середню безрозмірну температуру  $\theta = 0,27$  для значення критерію Фур'є  $F_o = 0,16$ , і за формулою (3.17) обчислюємо середню інтегральну температуру  $t = 70 - 0,27(70 - 15) = 55$  °С.

**Задача 3.** Березові бруски перетином 15 x 20 см вологістю 70% та початковою температурою 8 °С прогріваються у воді за  $t_c = 60$ °С протягом 3 годин. Визначити температуру у центрі поперечного перетину бруса.

Задачу вирішуємо шляхом послідовного визначення безрозмірної температури у середині необмежених пластин товщиною 15 см і 20 см.

Знаходимо коефіцієнт температуропровідності  $a$ . Базова щільність деревини берези становить  $\rho_0 = 500$  кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>. Фактична щільність за вологості 70% за рис.1.27 –  $\rho = 840$  кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>. Питому теплоємність за розрахункової температури  $t_p = (60 + 8)/2 = 34$  °С і вологості 70% знаходимо за діаграмою на рис. 1.28 –  $c = 2,95$  кДж (кг °С)<sup>-1</sup>. Коефіцієнт теплопровідності за розрахункової температури  $t_p = 34$  °С і вологості 70% знаходимо за діаграмою на рис. 1.29 та формулою (1.11) :  $\lambda = 0,38 \cdot 1 \cdot 1 = 0,38$  Вт(м °С)<sup>-1</sup>. Розраховуємо коефіцієнт температуропровідності:  $a = 0,38 / (2,95 \cdot 10^3 \cdot 840) = 1,53 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>(с)<sup>-1</sup>.

Визначаємо значення критерію Фур'є для першої і другою пластини товщиною 15 см і 20 см:

$$F_{o1} = \frac{1,53 \cdot 3600 \cdot 3}{0,075^2 \cdot 10^{-7}} = 0,295, \quad F_{o2} = \frac{1,53 \cdot 3600 \cdot 3}{0,12^2 \cdot 10^{-7}} = 0,166.$$

За номограмою (рис.3.8) для  $x/R = 1$ , оскільки в умові задачі вимагається знайти температуру у центрі бруса, безрозмірна температура для першої пластини становить  $\theta_1 = 0,62$ , а для другої пластини –  $\theta_2 = 0,85$ . Для бруса у цілому безрозмірну температуру на його центральній вісі визначають за (3.18):  $\theta = 0,62 \cdot 0,85 = 0,53$ .

Шукану температуру визначають за (3.17):  $t = 60 - 0,53(60 - 8) = 32,5$  °С.

**Задача 4.** Березові бруски також перетину і початкової температури як у Задачі 3, нагріваються у воді за температури  $t_c = 60$  °С. Визначити

тривалість процесу, що необхідна для доведення їх температури на центральній вісі до 40 °С.

Знаходимо безрозмірну температуру за (3.14) :

$$\theta = \frac{(60 - 40)}{(60 - 8)} = 0,385.$$

Критерій Фур'є знаходимо за номограмою (рис.3.8) для  $x/R=1$  і  $\theta = 0,385$  –  $F_0=0,50$ . Враховуючи визначений у попередній задачі коефіцієнт температуропровідності  $a = 1,53 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2(\text{с})^{-1}$  та рівняння (3.16) знаходимо час для прогрівання першої пластини :  $\tau_I = (0,50 \cdot 0,075)^2 / 1,53 \cdot 10^{-7} = 21800 \text{ с} = 18,4 \cdot 10^3 \text{ с}$ .

За діаграмою 3.9 для  $\theta = 0,385$  та співвідношенням розмірів пластин  $15/20 = 0,75$  знаходимо поправковий коефіцієнт  $c_\tau = 0,76$ . Тоді час нагрівання брусу становитиме за рівнянням (3.19) :  $\tau_{бр} = 18,4 \cdot 10^3 \cdot 0,76 = 14 \cdot 10^3 \text{ с} = 3,9 \text{ год}$ .

**Задача 5.** Дубові замерзлі бруси перетином 18 x 25 см, які мають початкову температуру  $t_0 = -25$  °С і вологість 75% обробляють у середовищі насиченої пари атмосферного тиску ( $t_c = 100$  °С). Розрахувати тривалість їх повного відтавання.

Визначаємо питомі витрати теплоти на розморожування одиниці об'єму матеріалу за (3.22), попередньо визначивши числові значення усіх величин: базову щільність деревини дуба  $\rho_0 = 560 \text{ кг}(\text{м}^3)^{-1}$ ; фактичну щільність за вологості 75% за рис.1.27 –  $\rho = 980 \text{ кг}(\text{м}^3)^{-1}$ ; питому теплоємність за розрахункової температури  $t_p = (0 + (-25))/2 = -12,5$  °С і вологості 75% за діаграмою на рис. 1.28 –  $c_{(t)} = 2,15 \text{ кДж}(\text{кг} \text{ °С})^{-1}$ ; вміст незамерзлої води –  $W_{з.р} = 17\%$  за табл.3.1:  $q_p = 980 \cdot 2,15 \cdot 10^3 \cdot 25 + 560 \cdot 335 \cdot 10^3 \left(\frac{75-17}{100}\right) = 161,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}(\text{м}^3)^{-1}$ . Для визначення тривалості повного відтавання використовуємо формулу (3.26). Попередньо визначимо коефіцієнт теплопровідності для розрахункової температури розмороженої зони  $t_p = (0 + 100)/2 = 50$  °С за діаграмою на рис. 1.29 та формулою (1.11) :  $\lambda = 0,43 \cdot$

$1,14 \cdot 0,93 = 0,46 \text{ Вт(м } ^\circ\text{C)}^{-1}$  та поправковий коефіцієнт  $c_\tau = 0,9$  за співвідношенням сторін  $S_m / S_{uu} = 18/25 = 0,72$  і безрозмірною температурою за (3.14) за умови, що  $t_x = 0$ , тобто  $\theta = (100-0)/(100-(-25)) = 0,8$ . Тоді тривалість повного розморожування становитиме:

$$\tau_{\text{п.р.бр.}} = 0,18^2 \cdot \frac{161,5 \cdot 10^6}{4 \cdot 0,46 \cdot 100} \cdot 0,9 = 25,6 \cdot 10^3 \text{ с} = 7,1 \text{ год.}$$

**Задача 6.** Заморожені соснові ( $\rho_0 = 415 \text{ кг(м}^3\text{)}^{-1}$ ) колоди діаметром 20 см, які мають початкову температуру  $t_0 = -10^\circ\text{C}$ , занурені для відтавання у басейн з водою з температурою  $t_c = 10^\circ\text{C}$ . Визначити тривалість відтавання заболоні колод за їх вологості 90% і середній глибині 4 см від поверхні.

Використовуємо рівняння (3.28). Для цього визначаємо усі величини, що входять до нього: щільність  $\rho = 760 \text{ кг(м}^3\text{)}^{-1}$  – рис.1.27; питому теплоємність  $c_{(-)} = 2,3 \text{ кДж (кг } ^\circ\text{C)}^{-1}$  за рис. 1.28 для розрахункової температури  $t_p = (0 + (-10))/2 = -5^\circ\text{C}$ ; вмісту незамерзлої вологи за табл.3.1. –  $W_{z,p} = 23\%$ ; питомі витрати теплоти розраховуємо за (3.22):  $q_p = 760 \cdot 2,3 \cdot 10^3 \cdot 10 + 415 \cdot 335 \cdot 10^3 \left(\frac{90-23}{100}\right) = 107,5 \cdot 10^6 \text{ Дж(м}^3\text{)}^{-1}$ ; коефіцієнт теплопровідності для розрахункової температури розмороженої зони  $t_p = (0+10)/2 = 5^\circ\text{C}$  за діаграмою на рис. 1.29 та формулою (1.11):  $\lambda = 0,37 \cdot 0,87 \cdot 1 = 0,32 \text{ Вт(м } ^\circ\text{C)}^{-1}$  та критерій глибини відтавання  $\Phi = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  за рис.3.12 для  $D = 20 \text{ см}$  і  $d = 20 - 4 \cdot 2 = 12 \text{ см}$ . Тоді шукана тривалість відтавання становитиме:

$$\tau = 6,7 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{107,5 \cdot 10^6}{0,32 \cdot 10} = 22,6 \cdot 10^6 \text{ с} = 6,3 \text{ год.}$$

**Задача 7.** Березові чурбаки діаметром 30 см, які мають початкову температуру  $-16^\circ\text{C}$  і вологість 85% проварюються у воді за  $t_c = 40^\circ\text{C}$ . Знайти тривалість оброблення, що необхідна для доведення температури  $t$  всередині чурбака на колі діаметром 8 см до  $30^\circ\text{C}$ .

Спочатку знаходимо тривалість повного відтавання за (3.29). Попередньо знаходимо значення усіх складових рівняння. Щільність берези за

вологості 85% знаходимо за рис. 1.27 з врахуванням її базової щільності  $\rho_0=500 \text{ кг(м}^3\text{)}^{-1}$  –  $\rho=925 \text{ кг(м}^3\text{)}^{-1}$ . Питома теплоємність за розрахункової температури  $t_p=(0+(-16))/2=-6 \text{ }^\circ\text{C}$  за рис. 1.28 становить  $c_{(-)}=2,25 \text{ кДж (кг }^\circ\text{C)}^{-1}$ . Вміст незамерзлої вологи за табл.3.1  $W_{3,p}=20\%$ . Питомі витрати теплоти розраховуємо за (3.22):  $q_p = 925 \cdot 2,25 \cdot 10^3 \cdot 16 + 500 \cdot 335 \cdot 10^3 \left(\frac{85-20}{100}\right) = 142 \cdot 10^6 \text{ Дж(м}^3\text{)}^{-1}$ . Коефіцієнт теплопровідності розмороженої зони визначаємо з врахуванням розрахункової температури  $t_p=(0+40)/2=20 \text{ }^\circ\text{C}$  за діаграмою на рис. 1.29 та формулою (1.11):  $\lambda=0,39 \cdot 1 \cdot 1=0,39 \text{ Вт(м }^\circ\text{C)}^{-1}$ . Отримані значення підставляємо у (3.29):

$$\tau_{\text{п.р.}} = 0,3^2 \cdot \frac{142 \cdot 10^6}{16 \cdot 0,39 \cdot 40} = 51,2 \cdot 10^3 \text{ с} = 14,2 \text{ год.}$$

Визначаємо додатковий час нагрівання у діапазоні позитивної температури  $\tau_{\text{дод.}}$  за (3.30). Для цього знаходимо коефіцієнт температуропровідності для відомих значень  $\lambda$ ,  $\rho$ . Питому теплоємність визначаємо для позитивної розрахункової температури  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  за рис. 1.28 –  $c=3,0 \text{ кДж (кг }^\circ\text{C)}^{-1}$ . Отже коефіцієнт температуропровідності становитиме

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{0,39}{3,0 \cdot 10^3 \cdot 925} = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2\text{(с)}^{-1}. \text{ Додатковий час нагрівання:}$$

$$\tau_{\text{дод.}} = \frac{0,096 \cdot 0,3^2}{1,4 \cdot 10^{-7}} \lg \left[ \frac{40}{40-30} \cdot \left(1 - \frac{8}{30}\right) \right] = 28,8 \cdot 10^3 \text{ с} = 8 \text{ год.} \quad \text{Загальний час}$$

оброблення дорівнює  $\tau = \tau_{\text{п.р.}} + \tau_{\text{дод.}} = 14,2 + 8 = 22,2 \text{ год.}$

### 3.7. Контрольні запитання

1. З якими явищами пов'язане гідротермічне оброблення деревини?
2. Назвіть три елементарних види теплообміну.
3. Які способи нагрівання деревини застосовуються у промисловості?
4. Для яких промислових цілей використовують кондуктивне, радіаційне та діелектричне нагрівання?
5. Якими фізичними явищами визначається процес конвекційного нагрівання деревини без зміни агрегатного стану?
6. За яким законом визначається переміщення теплоти в матеріалі?

7. За яким законом визначається теплообмін на межі деревини і газу або рідини?
8. Що таке стаціонарний теплообмін? Наведіть приклад.
9. Що таке коефіцієнт теплопередачі, де використовується?
10. Що таке нестационарний теплообмін, яким рівнянням описується?
11. Що таке одновимірні тіла? Наведіть приклад.
12. Що таке коефіцієнт температуропровідності, у яких одиницях вимірюється?
13. Що таке граничні умови? За яких граничних умов вирішується рівняння Фур'є для одновимірного тіла при нагріванні у повітрі або суміші повітря з газами?
14. За яких граничних умов вирішується рівняння Фур'є для одновимірного тіла при нагріванні у воді або насиченій парі?
15. Які дві протилежні задачі вирішують на підприємстві при нагріванні деревини?
16. Для чого розраховують середню інтегральну температуру сортиментів?
17. Чим принципово відрізняється процес розморожування деревини від попереднього?
18. Як змінюється температура деревини під час розморожування?
19. Які задачі вирішують на підприємстві для одновимірних тіл при розморожуванні?
20. За якою формулою визначають термін розморожування на задану глибину?
21. За якою формулою визначають термін повного розморожування?
22. За якою методикою знаходять час доведення будь-якої точки сортименту до заданої позитивної температури?

## 4. ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

### 4.1. Способи сушіння деревини

Сушіння деревини – дуже складний процес, який включає: міграцію вологи із середини на поверхню дошки та випаровування вологи з поверхні у рухомий повітряний потік. Закономірності його визначаються одночасним перебігом ряду фізичних явищ, що відносяться до класу явищ переносу, а саме:

- передача теплоти матеріалу від агенту сушіння або джерела теплової енергії – *теплообмін*;
- переміщення теплоти всередині матеріалу – *теплопровідність*;
- випаровування вологи з поверхні матеріалу в оточуюче середовище – *вологовіддача*;
- переміщення вологи всередині матеріалу – *вологоперенесення*.

Роль цих фізичних явищ для кожного конкретного способу сушіння – неоднакова. Відносна ефективність того чи іншого явища залежить від способу передачі теплоти деревині та інших умов. Деякі з цих явищ можуть бути визначальними для одних способів сушіння і суттєво не впливати – під час реалізації інших.

Класифікація видів і способів сушіння базується на особливостях передачі теплоти деревині. За цією ознакою розрізняють чотири види сушіння: конвекційне; кондуктивне; радіаційне та електричне (рис.4.1).

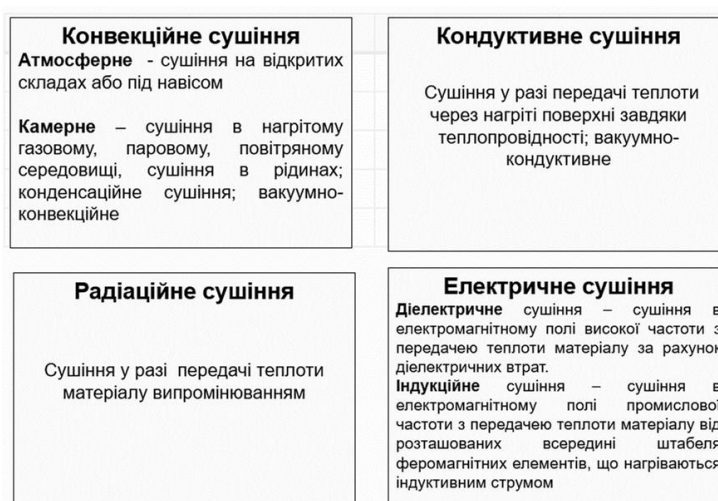


Рисунок 4.1. Види і способи сушіння деревини

Протягом багатьох років було випробувано багато способів сушіння деревини, але дуже мало з них стали цілком успішними і затребуваними. Масивну деревину (дошки, заготовки, тобто пилопродукцію), шпон та подрібнену деревину переважно висушують у конвекційним способом, застосовуючи різні способи та сушильні агенти. Кондуктивний та електричний види сушіння застосовують лише для масивної деревини. Радіаційний спосіб внаслідок незначної глибини проникнення інфрачервоного випромінювання у деревину може бути використаний лише для тонких матеріалів, тобто шпону. Сьогодні він використовується для висушування опоряджених поверхонь.

Найбільше використання серед способів сушіння має конвекційне сушіння. Вміст вологи у щойно зрубаній деревині може дуже коливатися – від понад 200% до лише 40%. Як тільки зрубана деревина починає сохнути і, за умови, що вона не контактує з вологим тілом та захищена від дощу, вона з часом висихає до вологи вміст якої знаходиться у рівновазі з навколишнім повітрям. Це може бути як 20% – у вологому кліматі, так і 6% – у теплому сухому середовищі. Висушити деревину потрібно якомога дешевше та ефективніше. Ідеально сушити деревину так швидко, наскільки це можливо без погіршення її якості. Цього можна досягти лише із складним управлінням процесу, основанийому на розумінні особливостей переміщення вологи у деревині.

#### **4.2. Переміщення вологи у деревині**

Під час сушіння волога рухається по деревині у вигляді рідини або пари через порожнини волокон, пори, отвори у мембранах пор, інші міжклітинні простори у всіх напрямках (рис.4.2). Деревні породи, що мають меншу щільність загалом сохнуть швидше, ніж породи з більшою щільністю, тому що їх структура містить більше отворів на одиницю об'єму.

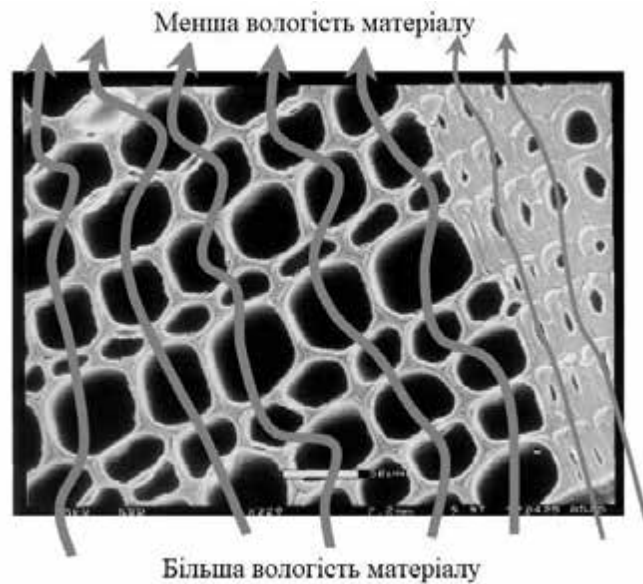


Рисунок 4.2. Схема руху вологи у деревині [ 8]

Відомо, що волога прагне розподілитися рівномірно, тобто прямує від місць з більшою вологістю до місць з меншою вологістю. Задача сушіння, яка полягає у видаленні вологи по всьому поперечному перетину деревини із доведенням вологості до бажаної, вимагає створення умов, що викликають рух вологи із середини матеріалу до поверхні. Просування вологи під час сушіння із середини до поверхні матеріалу відбувається значно повільніше, ніж видалення вологи з поверхні. Для прискорення руху вологи із середини матеріалу до поверхні необхідно понизити вологість поверхні деревини. Це реалізують шляхом омивання поверхні матеріалу повітрям, що має відносну вологість нижчу, ніж рівноважна по відношенню до вологості деревини, яка висушується. У результаті поверхневий шар матеріалу набуває рівноважної вологості, яка відповідає стану повітря і є нижчою за вологість внутрішніх шарів. Створення різниці у вологості внутрішніх та поверхневих зон викликає рух вологи до поверхні. Цей рух буде тривати до тих пір, поки вологість за перетином не вирівняється.

Характер руху вологи у деревині залежить від її початкової вологості, а саме наявності у ній двох форм вологи – вільної та зв'язаної, що є характерним для свіжозрубаної деревини, або лише зв'язаної вологи. У першому випадку висихання поверхні викликає зближення міцел – елементів фібрил, які є

складовими клітинної стінки. Це спричиняє підтягування під дією капілярних сил стовпчиків вологи, які знаходяться між міцелами клітинної стінки. У результаті виникає потік вологи у рідкому стані, яка буде випаровуватися на зовнішній поверхні клітини. Цей процес буде продовжуватися поки не буде видалена уся вільна волога з поверхневого шару клітин. Поки з першого шару клітин не буде видалена уся вільна волога тиск водяних парів буде дорівнювати тиску насичення. Коли тиск водяних парів стане нижче тиску насичення почнеться видалення вологи з другого шару, а стінка, що відділяє перший шар клітин від другого почне висихати. Після цього аналогічний процес буде проходити між клітинами другого та третього шару і т.д. Таким чином шар за шаром буде віддавати вільну вологу і включатися у потік вологи, що рухається від внутрішньої ще вологої зони до поверхні, підтягуючи також і зв'язану вологу.

У другому випадку, коли вологість деревини є меншою за межу насичення, випаровування вологи з поверхні матеріалу відбувається за рахунок міграції лише зв'язаної вологи. Поступово цей процес поглиблюється у товщу матеріалу, відокремлюючи поверхневі шари з низькою вологістю від внутрішньої зони.

Окрім різної вологості різниця парціальних тисків водяних парів може бути досягнута різницею температур, адже парціальний тиск водяних парів підвищиться на прогрітих ділянках, що викличе пересування вологи з більш нагрітих шарів до холодних. Це суттєво уповільнює процес камерного сушіння з використанням підвищених температур сушильного агента, оскільки рух вологи і теплоти у деревині буде мати різні напрямки – волога буде рухатися у матеріалі від середини до поверхні, а теплота – у зворотному напрямку від поверхні до центру.

Із підвищенням температури сушильного агента незначно знижується тиск у капілярах за рахунок зниження коефіцієнту поверхневого натягнення води і суттєво знижується її в'язкість. Останній фактор сприяє збільшенню

руху вологи  $i$ , відповідно, швидкості висихання, що лімітується саме швидкістю просування вологи, а не швидкістю її випаровування з поверхні.

### 4.3. Рух вологи у деревині під дією різних градієнтів

Особливості процесу сушіння і його механізм визначається головним чином характером перенесення, тобто переміщення вологи всередині матеріалу. На цей процес впливають такі чинники як:

- градієнт вологості (волога переміщується у напрямку зниженої вологості);
- градієнт температури (волога переміщується у бік меншої температури);
- градієнт надлишкового тиску (волога переміщується у бік меншого тиску).

Роздивимось докладно закономірності руху вологи під дією цих градієнтів.

Закономірності руху вологи під дією градієнту вологи, що називається вологопровідністю, формуються аналогічно закономірностям теплопровідності. Якщо виразити коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  через коефіцієнт температуропровідності  $a$  (Розділ 3), отримаємо:

$$q = -ac\rho \frac{dt}{dx}. \quad (4.1)$$

Аналогічно рівняння вологопровідності, яке вважається формулюванням закону вологопровідності і встановлює, що щільність потоку вологи пропорційна градієнту вологовмісту і коефіцієнту вологопровідності, матиме вигляд:

$$i = -a'\rho_0 \frac{du}{dx}, \quad (4.2)$$

де  $i$  - щільність потоку вологи (тобто маса вологи, що проходить за одиницю часу крізь одиницю площі);  $a'$  - коефіцієнт вологопровідності (аналог коефіцієнту теплопровідності);  $\rho_0$  - щільність речовини в абсолютно сухому стані.

Розрахунки тривалості сушіння вимагають знання числових величин коефіцієнту вологопровідності деревини, який є важливим показником фізичних властивостей і визначається експериментальним шляхом. Його розмірність така сама, як і коефіцієнта теплопровідності  $m^2/s$  або  $cm^2/s$ ; величина залежить від:

- температури – із збільшенням якої  $a'$  суттєво зростає внаслідок збільшення коефіцієнту дифузії водяної пари і зниження в'язкості рідини у капілярах;
- породи деревини – у разі збільшення щільності  $a'$  зменшується тому що інтенсивність вологоперенесення зменшується внаслідок зменшення відносного об'єму капілярів;
- місця розташування зразка у стовбурі – значення  $a'$  менше у ядрі та спілій деревині порівняно із заболонню; найбільше значення  $a'$  – уздовж волокон; у радіальному напрямку  $a'$  більше ніж у тангенціальному внаслідок впливу серцевинних променів.

З діаграми можна знайти коеф. вологопровідності в тангенціальному напрямку, у поздовжньому він вище у 15-20 разі, в радіальному він вище: для сосни, ялини – у 1,1 рази; для берези – у 1,2 рази; для дуба і бука – у 1,5 рази.

Рівняння (4.2) справедливо лише за вологості деревини нижче за межу насичення клітинних стінок  $W < W_{m.n.}$ . Це пов'язано з наявністю у деревині двох форм зв'язку вологи. Волога у деревині рухається як у вигляді рідини по капілярній системі, так і вигляді пари по вільних просторах. Потенціалом руху рідини є капілярний тиск, а пари – парціальний тиск. За вологості  $W < W_{m.n.}$  і капілярний тиск, і парціальний тиск залежать від вмісту вологи, тому градієнт вологи може бути рушійною силою як рідини, так і пари.

За вологості  $W > W_{m.n.}$ , коли у порожнинах клітин знаходиться вільна волога, а її видалення не викликає збільшення капілярного тиску, оскільки радіус найбільших капілярів (судин, трахеїд, волокон лібриформу тощо) залишається незмінним. Також незмінним залишається і тиск водяної пари, який дорівнює тиску насичення. Отже, і капілярний тиск і парціальний тиск

залишаються однаковими по всьому об'єму, а їх градієнти дорівнюють нулю. Тому градієнт вологості не може бути рушійною силою вологоперенесення.

Проте, рівняння вологопровідності використовують для аналізу тривалості сушіння для обох випадків. Справа в тому, що за вологості  $W < W_{м.н}$  воно є справедливим для всього об'єму висушуваної деревини, за вологості  $W > W_{м.н}$  – визначає інтенсивність міграції вологи у поверхневій зоні, вологість якої одразу стає меншою за величину  $W_{м.н}$ .

Рух вологи під дією нерівномірного температурного поля, тобто градієнта температури називається термоволопровідністю. Якщо у деревині за умови відсутності вологообміну із середовищем, створити деякий температурний перепад, то виникне переміщення вологи спрямоване ц бік меншої температури. Це викличе збільшення вологості в області зниженої температури і зменшення її в області збільшеної температури. Таким чином, утвориться градієнт вологи, під дією якого волога буде прямувати у протилежному попередньому руху напрямку. При цьому волога може накопичуватися на певній ділянці, створюючи локальне її скупчення, що має назву «умовне джерело вологи». Таке явище є характерним для пилопродукції з високою початковою вологістю у разі сушіння її у камерах, що обігріваються гарячою водою, коли процес прогрівання матеріалу супроводжується видаленням вологи – рис.4.3.

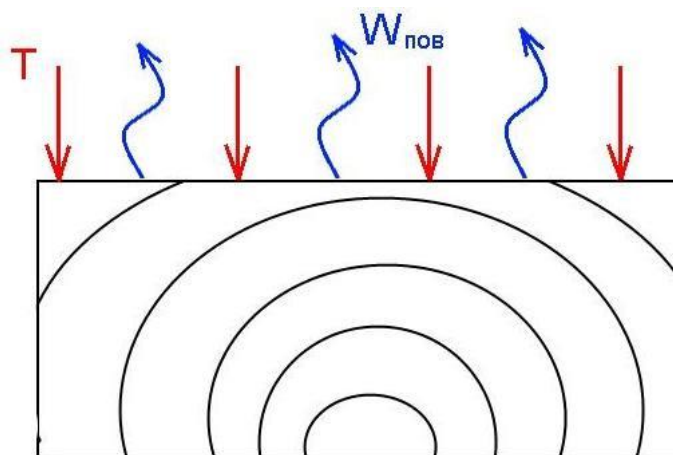


Рисунок 4.3. Схема руху вологи і теплоти під дією градієнта температури

Рівняння термовологопровідності має вигляд:

$$i = -a' \rho_0 \delta \frac{dt}{dx}, \quad (4.3)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт термовологопровідності, який дорівнює відношенню градієнта вологості до градієнта температури  $\delta = du/dt$ ,  $\%(\text{°C})^{-1}$ .

На коефіцієнт термовологопровідності за вологості деревини нижче  $W_{mn}$  впливає лише вологість деревини, а за вологості вище  $W_{mn}$ , ще й температура – рис. 4.1.

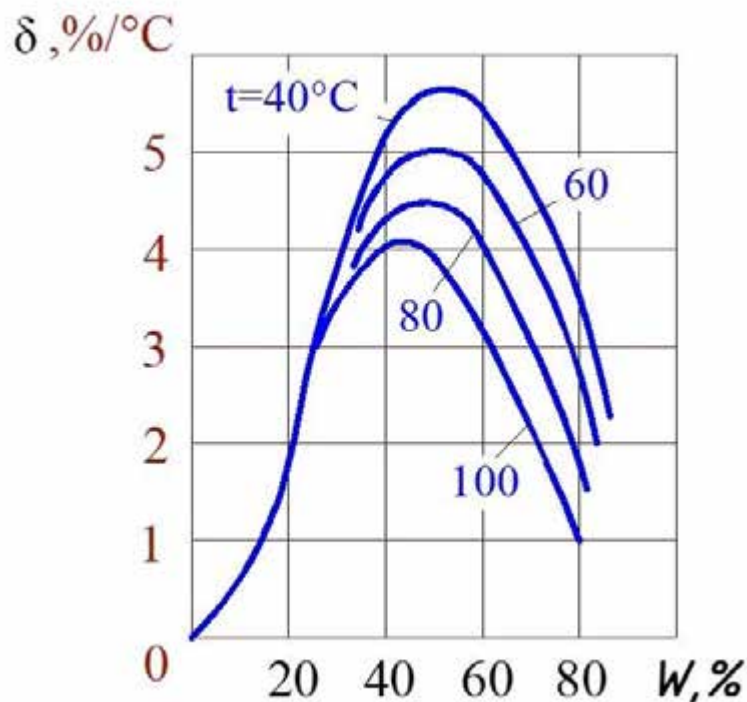


Рисунок 4.4. Діаграма залежності коефіцієнту термовологопровідності деревини поперек волокон

Термовологопровідність, як і вологопровідність – складне явище; де також спостерігається одночасне переміщення по матеріалу пари і рідини, потенціалами переносу яких також є парціальний тиск пари і капілярний тиск рідини.

За певних умов у процесі сушіння всередині деревини може створюватися і довгий час підтримуватися надлишковий (порівняно з атмосферним) тиск пароповітряної суміші. У результаті цього виникає стійка безперервна течія водяної пари (іноді рідини) по капілярній системі деревини,

що носить назву молярне вологоперенесення. Інтенсивність його визначається рівнянням:

$$i = -b \frac{dp}{dx}, \quad (4.4)$$

де  $b$  – коефіцієнт молярного перенесення, який вимагає експериментального визначення, але поки відсутні його чисельні значення.

Кожне з наведених рівнянь визначає щільність потоку вологи у деревині під дією тільки однієї з рушійних сил. Коли діють всі три сили, їх ефект підсумовується і рівняння вологоперенесення в узагальненому вигляді є таким:

$$i = -a' \rho_0 \left( \frac{du}{dx} + \frac{dt}{dx} \right) - b \frac{dp}{dx}. \quad (4.5)$$

Враховуючи відсутність даних про молярне перенесення актуальним сьогодні у разі конвекційного сушіння пилопродукції є рівняння вологоперенесення, що враховує перші дві складові.

#### 4.4. Механізм процесу сушіння деревини

Механізм процесу сушіння не може бути однаковим у всіх випадках. Він залежить від порівняльної ефективності кожної із рушійних сил вологоперенесення. Основними ознаками сушіння, що характеризують процес, є рівні початкової вологості та температури середовища. По кожній з них процеси можуть поділятися на дві групи:

- за рівнем початкової вологості деревини: процеси сушіння з початковою вологістю нижче та вище  $W_{mn}$ , що обумовлено особливостями вологопровідності деревини;

- за рівнем температури середовища: низькотемпературні процеси ( $t < 100^\circ\text{C}$ ) та високотемпературні процеси ( $t > 100^\circ\text{C}$ ), що обумовлено особливостями пароутворення (випаровування у першому випадку і кипіння у другому).

Низькотемпературний процес конвекційного сушіння є найбільш розповсюдженим видом камерного сушіння деревини. У цьому випадку роль

градієнт тиску є незначною. Міграція вологи відбувається переважно у напрямку товщини дошки. Весь період сушіння можна поділити на період з постійною швидкістю видалення вологи та на період із спадаючою швидкістю.

Період постійної швидкості сушіння є характерним для дошок із високою початковою вологістю  $W \geq 60\%$ , що мають значну кількість заболонної частини і висушуються у помірних умовах. Після прогрівання з поверхні матеріалу випаровується деяка кількість вільної вологи аналогічно процесу випаровування вологи з вільної поверхні. При цьому поверхня дошок має вологість вищу за межу насичення. Відповідно тиск пари дорівнює тиску насичення, що залежить від температури сушильного агенту.

Після досягнення поверхнею матеріалу вологості межі насичення починає випаровуватись зв'язана волога. Швидкість її випаровування поступово сповільнюється внаслідок зменшення градієнту вологості. Час, за який з поверхні матеріалу випаровується зв'язана волога називають періодом із спадаючою швидкістю сушіння.

Процеси сушіння у сушильній техніці прийнято аналізувати за кривими змінювання у часі середньої вологості матеріалу (криві сушіння) і його температури всередині та на поверхні (температурні криві), а також за кривими розподілення вологості за товщиною матеріалу на різних етапах сушіння.

При низькотемпературному процесі у разі сушіння пилопродукції з високою початковою вологістю  $W \geq 60\%$  процес починається з видалення вільної вологи, що знаходиться у поверхневому шарі деревини (рис.4.2). Після віддалення із цього шару вільної вологи, між поверхневими та внутрішніми шарами з'являється градієнт капілярних тисків, який забезпечує підтягнення до поверхні вільної вологи по мірі її випаровування. Спочатку підсмоктування відбувається з ближніх шарів і вологість поверхні деревини при цьому підтримується постійною, близькою до вологості межі насичення  $W_{\text{мн}}$ . Швидкість сушіння в цей період процесу є постійною і визначається інтенсивністю випаровування з поверхні (ділянка АБ на рис.4.4).

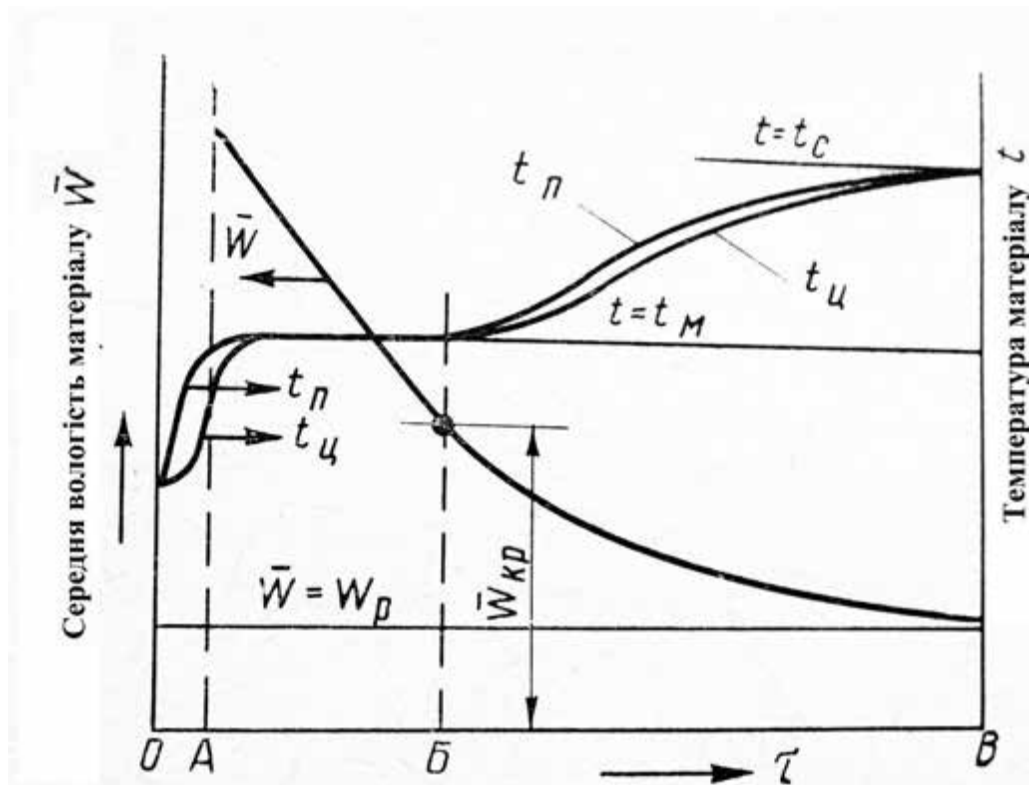


Рисунок 4.4. Основні криві процесу низькотемпературного процесу сушіння деревини за  $W_p > W_{м.н.}$  [14]

Такий процес є характерним у разі висушування пилопродукції у камерах з водяним теплопостачанням. Він може займати близько 30%-50% від загального часу сушіння зростаючи при збільшенні товщини матеріалу. На його тривалість також впливає щільність деревини. Для щільної деревини період АВ є більшим [2].

По мірі збільшення шляху вільної вологи, швидкість підсмоктування зменшується і настає момент коли вона стає менше можливої швидкості випаровування. Після цього по товщині сортименту утворюються дві зони: поверхнева із вологістю нижчою за  $W_{мн}$ , де діє градієнт вологості і внутрішня з вологістю вищою за  $W_{мн}$ , де діють сили капілярного тиску. Цей період обумовлюється спадаючою швидкістю сушіння (ділянка БВ рис.4.4). Вологість деревини, що відповідає завершенню періоду із постійною швидкістю сушіння і початку спадаючого – називають критичною  $W_{кр}$ . Її величина залежить від товщини сортименту та стану сушильного агенту.

Температура поверхні матеріалу під час прогрівання швидко збільшується. Під час постійної швидкості сушіння залишається постійною, і дорівнює температурі змоченого термометру  $t_m$  (границі охолодження). У періоді спадаючої швидкості температури поверхні деревини зростає, прямуючи до температури середовища  $t_c$  по мірі наближення вологості матеріалу до рівноважної вологості  $W_p$ . Температура центральної частини у період прогрівання є нижчою за температуру поверхні. Під час постійної швидкості сушіння дорівнює їй, а при спадаючій є трохи нижчою.

У разі проведення низькотемпературного процесу при сушінні деревини з початковою вологістю нижчою за межу насичення  $W_n < W_{мн}$  відбувається десорбція вологи у повітря. Деревина при цьому прагне набуті стійкої вологості (рис.4.5).

Десорбція починається з поверхневих шарів деревини. Під дією градієнту вологості, який виникає за таких умов, відбувається переміщення вологи на поверхню із середини і, як слідство, подальше зниження вологості сортименту.

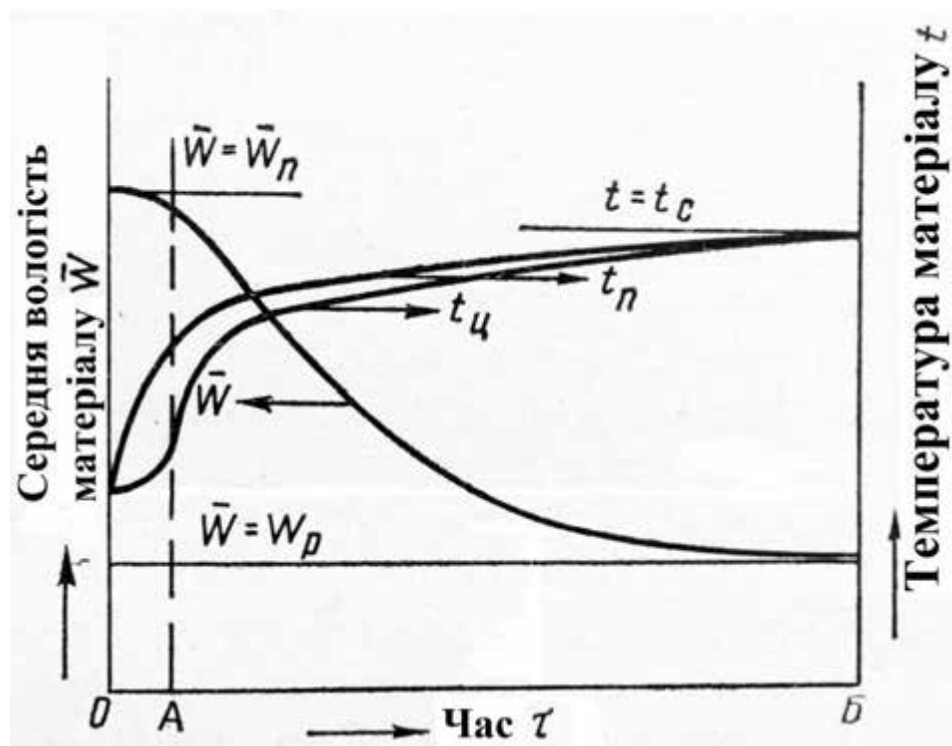


Рисунок 4.5. Основні криві процесу низькотемпературного процесу сушіння деревини за  $W_n < W_{мн}$ . [14]

Температура поверхні матеріалу  $t_n$  спочатку (при прогріванні) швидко, а потім уповільнено (при сушінні) підвищується поступово наближуючись до температури середовища. Температура центральної зони  $t_u$  у період прогрівання є нижчою за температуру поверхні (ділянка ОА рис.4.5), а у періоді сушіння поступово наближується до неї (ділянка АБ рис.4.5) .

Середня вологість сортименту під час початкового прогрівання майже не змінюється тому, що дія градієнту вологості врівноважується дією протилежного за знаком градієнту температури. Під час сушіння рух вологи визначається переважно вологопровідністю. Швидкість зменшення вмісту вологи спочатку є максимальною (відповідно величині перепаду вологості між поверхнею і центром  $\Delta W$ ), а потім зменшується. Вологість деревини прямує до стійкої вологості , тобто до рівноважної вологості  $W_p$ .

#### **4.5. Напруження і деформації у деревині під час сушіння**

Процес конвекційного сушіння деревини супроводжується нерівномірним за об'ємом розподіленням вологості. Це викликає нерівномірне усихання, що у свою чергу є причиною утворення внутрішніх напружень.

На початку процесу поверхневі шари мають вологість вищу за межу насичення і, відповідно, не прагнуть всохнути, тому напруження відсутні (рис. 4.6 а момент 0). Через деякий час вологість поверхневих шарів стає нижчою за  $W_{mn}$  (рис. 4.6 а момент 1) і вони прагнуть усохнути. Проте це прагнення не може реалізуватися у повній мірі внаслідок протидії внутрішній шарів, вологість яких є значно вищою за  $W_{mn}$  і вони не усихають.

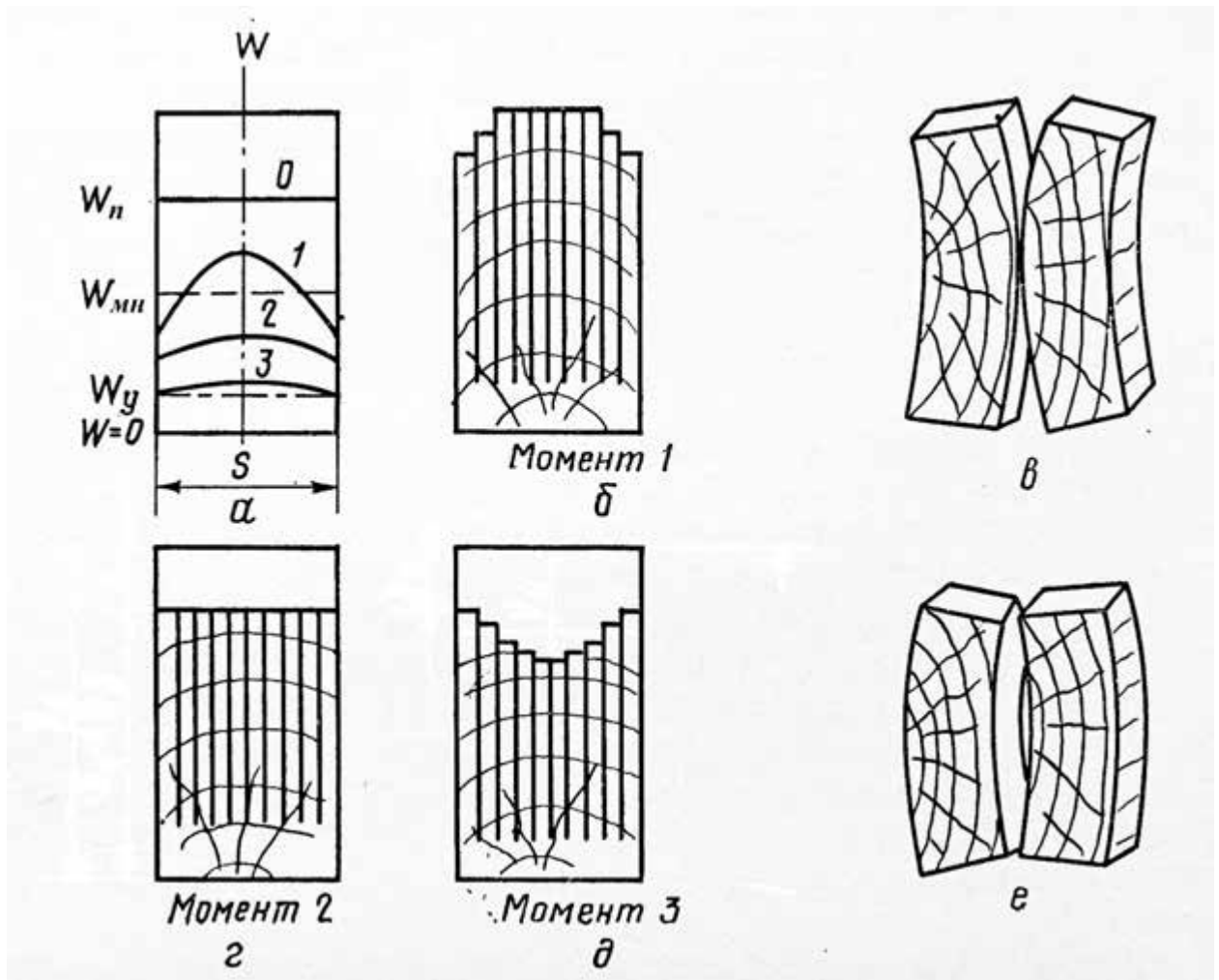


Рисунок 4.6. Схеми до розвитку деформацій та напружень під час сушіння [14]

Якщо випилати з матеріалу тонку пластинку – секцію і розкроїти її на шари за товщиною можна побачити, що внутрішні шари зберегли свій початковий розмір по ширині, а поверхневі шари – усохли і у вільному стані прийняли такий розмір, що відповідає їх фактичній вологості. Цілий нерозрізаний зразок має ширину не змінив.

Таким чином, у цей момент 1(рис.4.6 б) реальний розмір поверхневих шарів є більшим їх розміру у вільному стані, тобто вони відчувають розтягуючі напруження. Внутрішні шари, реальний розмір яких менше розміру у вільному стані відчувають стискаючі напруження. Внутрішні напруження, що виникли без прикладення зовнішніх навантажень, завжди врівноважуються в границях даного тіла. Щоб їх виявити, слід порушити цю

рівновагу шляхом розкрою зразка на частини, які прагнуть до нового врівноваженого стану за рахунок власної деформації (рис.4.6 в).

Якщо б деревина була ідеально пружним тілом, внутрішні напруження, що з'явилися у ній протягом першої стадії процесу, у разі зменшення перепаду вологості також би зменшувалися і поступово щезали при остаточному вирівнюванні вологості. Дійсно, на деякому проміжному етапі (рис.4.6 г момент 2) напруження у деревині щезають, а потім наприкінці процесу зростають, змінивши свій знак. Причиною цього є розвиток залишкових деформацій.

Залишкові деформації виникають у деревині що довгий час знаходилася під напруженням, навіть маючи стабільний вологісний стан. До того ж при висиханні пружні деформації в ній перероджуються в залишкові у зв'язку з тим, що у разі зниження вологості суттєво збільшується модуль її жорсткості.

На початковій стадії процесу, коли волога нагріта деревина має збільшену податливість, у поверхневих шарах під дією напружень розтягу виникають залишкові деформації подовження, а у внутрішніх, навпаки, залишкові деформації скорочення. У результаті наприкінці процесу (рис.4.6д момент 3) усихання поверхні буде меншим за усихання центру. Інакше кажучи, розмір поверхневих шарів у вільному стані буде більше розміру внутрішніх шарів у такому ж стані. Отже, у деревині виникнуть залишкові стискаючі напруження на поверхні і розтягуючі всередині. Секція розрізана на дві частини, буде деформуватися інакше (рис.4.6е).

Якщо внутрішні напруження у бідь-якій точці сортименту досягнуть границі міцності, відбудеться руйнування матеріалу – з'являться розриви тканин у зоні дії напружень розтягу (у першій стадії – на поверхні, а наприкінці – всередині матеріалу).

Під час конвекційного сушіння зовсім запобігти виникненню у деревині внутрішніх напружень неможливо. Проте дотримуючи правильного режиму сушіння їх величину можна суттєво знизити і попередити руйнування матеріалу. Крім того, залишкові внутрішні напруження можуть бути не лише

зменшені, а й ліквідовані вологотеплообробкою деревини наприкінці процесу. Під час такого оброблення відбувається зволоження стиснутих поверхневих шарів, що призводить до розвитку в них залишкових деформацій скорочення, які компенсують раніше виниклі залишкові деформації подовження.

Діючі напруження в деревини, так звані повні внутрішні напруження,  $\sigma_{пов}$ , можна розглядати як алгебраїчну суму протилежних за знаком вологісних  $\sigma_{вол}$  і залишкових  $\sigma_{зал}$  напружень (рис.4.7) . Вологісні напруження характерні для абсолютно пружного тіла і обумовлені нерівномірним за об'ємом усиханням деревини. Вони мають тимчасовий характер і щезають і у разі вирівнюванні вологості. Залишкові напруження обумовлені наявністю у деревині неоднорідних залишкових деформацій.

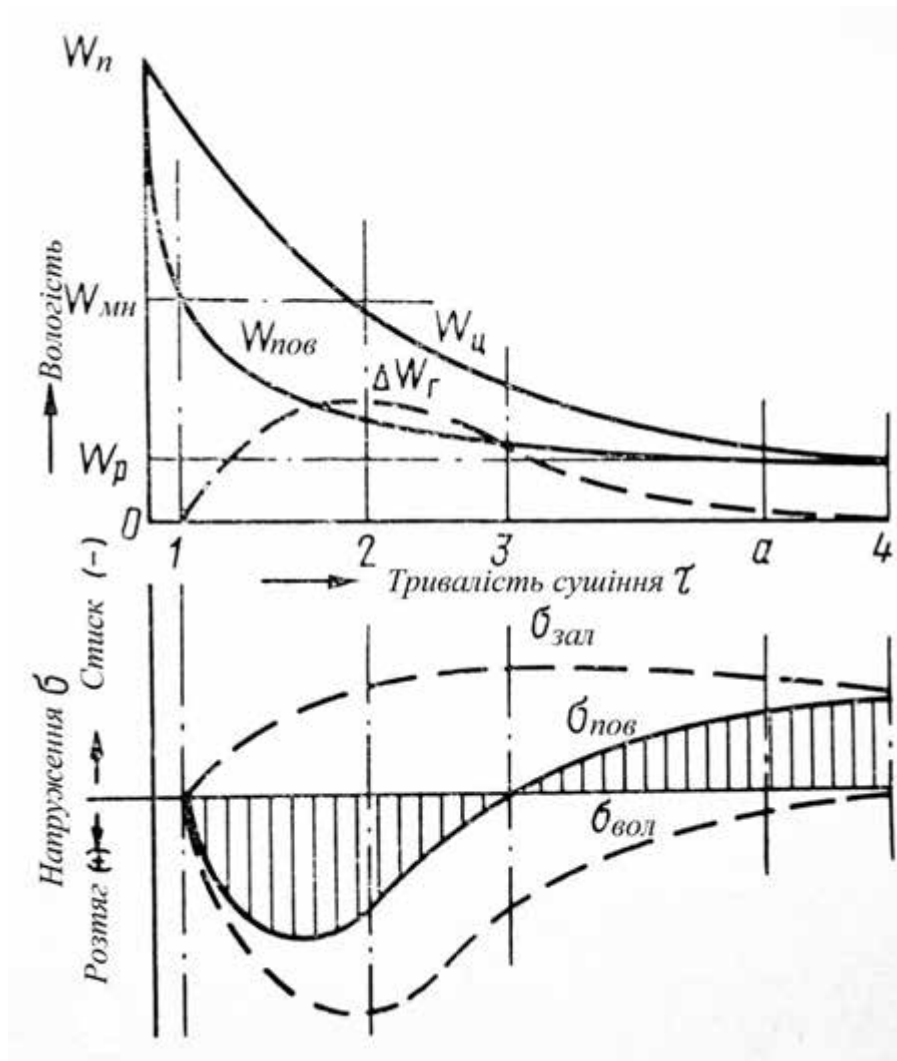


Рисунок 4.7. Ілюстрація зміни вологісних, залишкових та повних напружень у поверхневій зоні у процесі сушіння деревини [14]

Видно, що на початку процесу (момент 0–1) вологість деревини є ще більшою за вологість межі насичення  $W_{\text{мн}}$  і усихання не відбувається. Коли вологість поверхневих шарів стає нижчою за  $W_{\text{мн}}$ , виникають вологісні напруження розтягу (момент 1–2). Вони викликають залишкові деформації подовження, що приводять до виникнення стискаючих залишкових напружень.

Підсумкові повні напруження мають знак більшої складової (+). Під дією повних напружень розтягу залишкові подовження поступово збільшуються і відповідно збільшуються залишкові напруження.

Після зниження вологості центральних зон до величини меншої за  $W_{\text{мн}}$ , перепад вологості зменшується і, відповідно, зменшуються вологісні напруження. Повні напруження також зменшуються, тому і збільшення залишкових напружень уповільнюється. У деякий час (момент 3) вологісні напруження стають рівними за величиною залишковим, а повні – щезають. Цим закінчується перший етап розвитку напружень, коли на поверхні матеріалу діють повні напруження розтягу, а всередині – стискаючі напруження.

На другому етапі вологісні напруження продовжують зменшуватись, а повні напруження змінюють свій знак. Під дією повних стискаючих напружень залишкові подовження зменшуються і це приводить до зменшення залишкових напружень. Це зменшення не є дуже суттєвим тому, що внаслідок зменшення вологості деревина стала менш податливою.

У деревині із вирівняною вологістю (момент 4) вологісні напруження прямують до 0, а повні – мають тільки одну складову – залишкові стискаючі напруження. Як правило, процес сушіння завершується раніше, коли у матеріалі ще присутній перепад вологості.

Для правильного проведення процесу сушіння необхідно вміти контролювати внутрішні напруження в деревині. Якісну оцінку для виробничих цілей можна побачити по вигину пластинок розколотих секцій (рис.4.4 е) або по деформаціях силових секцій.

#### 4.6. Принципи побудови раціональних режимів сушіння деревини

Залежно від розмірів, форми і призначення деревних матеріалів висувають різні вимоги до режимів сушіння. Режимом сушіння називається розклад стану сушильного агенту в процесі сушіння. Раціональний режим сушіння повинен забезпечити мінімальну тривалість процесу при збереженні якості матеріалу.

При сушінні пиломатеріалів порушення їх цілісності недопустимо, тому треба створити такі умови обробки, щоб величина внутрішній напружень не перебільшувала границі міцності. Для більш чіткого розуміння процесу сушіння пиломатеріалів його поділяють на етапи залежно від вологості деревини і можливих очікуваних дефектів (табл.4.1).

Таблиця 4.1. Етапи сушіння [28]

Етапи	Вологість деревини	Дефекти, які можуть виникати
I	Від свіжозрубаного стану до $2/3$ від вологості цього стану	Утворення поверхневих, торцевих тріщин, забарвлення, жолоблення
II	Від $2/3$ початкової вологості до $W=30\%$	Збільшення поверхневих та торцевих тріщин
III	Від $W=30\%$ до необхідної кінцевої вологості	Утворення внутрішніх тріщин поперечне жолоблення, пересушування
IV	Завершення	Нерівномірна вологість дошок, залишкові напруження

Для запобігання утворення вказаних дефектів на початку процесу необхідно забезпечити малу величину перепаду вологості між поверхнею і вологістю межі насичення ( $W_{mn} - W_{нов}$ ). Для цього застосовують режими з високою ступеню насиченості  $\phi$  сушильного агенту, що уповільнює видалення вологи з поверхні. По мірі висихання деревини величину  $\phi$  необхідно

поступово знижувати. На третьому етапі її суттєво знижують щоб досягти необхідної кінцевої вологості деревини.

Температуру середовища на початку процесу не слід підтримувати високою, щоб не зменшити міцність поверхневих шарів, що призвело б до розриву волокон. Для інтенсифікації видалення вологи на другому етапі температуру дещо збільшують. Наприкінці процесу температуру значно підвищують – це інтенсифікує процес і вже не сприятиме зниженню міцності деревини, тому що остання матиме вже знижену вологість.

Отже, для сушіння пиломатеріалів раціональними вважаються режими з такою зміною параметрів сушильного агенту – рівень температури збільшується по мірі видалення вологи з деревини, а ступінь насичення повітря, навпаки, зменшується.

Щодо сушіння інших матеріалів – шпону та подрібненої деревини, то тут застосовують інші режими. Технологія подальшого використання цих матеріалів – склеювання у плити, не висуває жорстких вимог до розтріскування висушених листів шпону чи деревних частинок. Тому режими сушіння повинні забезпечувати лише максимальну інтенсифікацію процесу при збереженні хімічних властивостей та мікроструктури деревини.

На відміну від режимів сушіння пиломатеріалів температура сушильного агенту у процесі знижується. Це пояснюється тим, що на початку сушіння, коли вологість матеріалу є високою, підвищення температури середовища до 200 – 300 °C і вище суттєво збільшує швидкість видалення вологи. Оскільки у деревини присутня вільна волога, температура матеріалу залишається на рівні 100 °C і ніяких хімічних змін не відбувається. По мірі зниження вологості температура деревини наближається до температури середовища і, для запобігання хімічних змін і запалювання матеріалу, температуру сушіння знижують.

Для порівняння між собою різних режимів сушіння пиломатеріалів використовують три критерії: жорсткості, ефективності та безпеки.

Критерій жорсткості характеризує інтенсивність випаровування вологи у сушильний агент певного стану. Більш жорстким вважається той режим, що забезпечує більш інтенсивне випаровування вологи. Жорсткість режиму визначається параметрами сушильного агента і вологістю матеріалу, оскільки за рівних зовнішніх умов інтенсивність випаровування зменшується із зниженням вологості деревини. З двох режимів з однаковою відносною вологістю повітря,  $\varphi$ , що можуть застосовуватись для однакового за вмістом вологості матеріалу, більш жорстким буде режим, що має підвищену температуру. За однакової температури – більш жорстким буде режим із зниженою величиною,  $\varphi$ . Якщо режими мають різні значення температури,  $t$ , і відносною вологості,  $\varphi$ , то показником їх жорсткості може бути психрометрична різниця –  $\Delta t = t_c - t_m$ .

Критерій ефективності характеризується тривалістю сушіння певного матеріалу за заданого режиму. Ефективність одного режиму порівняно з іншим оцінюється відношенням тривалості процесів.

Критерій безпеки,  $B$ , визначає наскільки даний режим запобігає руйнуванню деревини під дією внутрішніх напружень. Його величина оцінюється відношенням границі міцності деревини,  $\sigma_{гм}$ , до максимальних напружень,  $\sigma_{max}$ , що виникають у ній:

$$B = \sigma_{гм} / \sigma_{max}. \quad (4.6)$$

Якщо критерій безпеки буде  $B > 1,0$ , режим вважається безпечним, у разі  $B \leq 1,0$  – деревина буде розтріскуватись. Критерій  $B$  можна розрахувати за методикою Б.Н.Уголева [29]. Знайдені розрахунковим методом напруження зіставляють із границею міцності на розтяг деревини у той момент часу і у тій зоні дошки де вони є максимальними, а саме на початку процесу – на поверхні, а наприкінці процесу – у центрі.

#### 4.7. Контрольні запитання

1. Які фізичні закономірності процесів сушіння деревини?
2. За яким принципом класифікують способи сушіння?
3. Під дією яких градієнтів відбувається рух вологи у деревині?

4. За яких умов можна використовувати рівняння вологопровідності для визначення терміну сушіння?
5. Від яких величин залежить коефіцієнт вологопровідності?
6. За яких умов рух вологи у деревині відбувається під дією коефіцієнту термовологопровідності.
7. Від чого залежить коефіцієнт термовологопровідності?
8. За яких умов рух на вологи у деревині впливає градієнт тиску?
9. Які основні ознаки, що характеризують процес сушіння?
10. Охарактеризуйте криві сушіння пиломатеріалів за вологості більше та менше межі насичення.
11. Чим відрізняється механізм низькотемпературних режимів сушіння від високотемпературних режимів?
12. Яка важлива задача практики сушіння?
13. Що є причиною утворення сушильних напружень?
14. Які напруження виникають на поверхні матеріалу на початку процесу?
15. Чому внутрішні напруження у процесі сушіння деревини змінюють знак?
16. Що таке повні напруження? Які їх складові?
17. Що таке залишкові деформації, яка причина їх виникнення?
18. Що призводить до руйнування матеріалу під час сушіння?
19. Як зменшити величину внутрішніх напружень у деревині під час сушіння?
20. Як розвиваються вологісні, залишкові та повні напруження у деревині під час сушіння?
21. Що таке режим сушіння і його задачі?
22. Які критерії існують для порівняння режимів між собою?
23. Які принципи побудови режимів сушіння пиломатеріалів, шпона і подрібненої деревини?

## **5. КОНВЕКЦІЙНІ СУШИЛЬНІ КАМЕРИ ДЛЯ ПИЛОПРОДУКЦІЇ**

### **5.1. Принципові схеми сушарок**

Найбільш розповсюдженими у промисловості є конвекційні сушарки, які мають декілька різновидів і поділяються за такими ознаками: конструктивне оформлення, характер сушильного агенту, кратність циркуляції і принцип дії.

За конструктивним оформленням у деревообробній промисловості використовують:

камерні сушарки – спеціальні приміщення (камери) куди завантажують деревину на візках по рейках або на піддонах автозавантажувачем; вони призначені переважно для сушіння пиломатеріалів;

роликові сушарки – призначені для висушування плоских матеріалів (шпону, плит), які переміщується роликівими конвеєрами через сушильний простір;

пневматичні сушарки – працюють за принципом сушіння матеріалу у зваженому стані у потоці повітря і призначені для сушіння подрібненої деревини;

барабанні сушарки – обертовий барабан, в середині якого матеріал (подрібнена деревина) переміщується і висушується;

стрічкові сушарки – висушуваний матеріал переміщується стрічковим конвеєром через їх сушильний простір, вони призначені для сушіння шпону та подрібненої деревини.

За характером сушильного агенту, що застосовується, сушарки поділяються на:

повітряні – агентом сушіння є вологе повітря;

газові – агентом сушіння є топкові гази у суміші із повітрям;

парові – агентом сушіння є перегріта пара.

За кратністю циркуляції розрізняють сушарки з одно- та багатократною циркуляцією сушильного агенту. У першому випадку агент після омивання висушуваного матеріалу повністю викидається в атмосферу; у другому –

викидається лише частково і проходить багаторазово крізь штабель або шар матеріалу.

За принципом дії сушильні пристрої поділяються на: періодичної та безперервної дії. У сушарках періодичної дії цикл складається із повного завантаження пристрою матеріалом, безпосередньо сушіння і повного розвантаження сушарки. У сушарках безперервної дії сам процес сушіння не припиняється; матеріал завантажується у пристрій, транспортується крізь нього і розвантажується безперервно.

Сушильний агент, що циркулює у пристрої, після проходження через штабель або шар висушуваного матеріалу змінює свої параметри, а перед новим надходженням у штабель відновлює свої параметри за допомогою нагрівних та повітрообмінних пристроїв. Графік зміни стану повітря у сушарках різних принципових схем відображається на відповідних діаграмах ( $Id$ ,  $Ida$  – діаграмах).

Принципові схеми сушарок відрізняються між собою кратністю циркуляції і видом сушильного агента. Існують варіанти повітряних та газових сушарок з однократною та багатократною циркуляцією, конденсаційні сушарки та сушарки, що працюють на перегрітій парі.

Принципова схема повітряної сушарки з однократною циркуляцією є досить простою (рис. 5.1). Свіже повітря у стані 0 надходить до калорифера. Процес нагрівання відображається на  $Id$  – діаграмі нагрівання відрізком 0-1 ( $d=const$ ). У стані 1 повітря підводиться до штабелю і при проходженні крізь нього або крізь шар висушуваного матеріалу, випаровує з матеріалу вологу. Процес випаровування відображається на  $Id$  – діаграмі відрізком 1-2 ( $I=const$ ). Відпрацьоване повітря у стані 2 повністю викидається у атмосферу.

Недоліком цієї сушарки є неекономічність, неможливість регулювання стану повітря, яке може характеризуватися тільки лише точками, що розташовані на вертикалі  $d=const$ , яка проходить через точку 0.

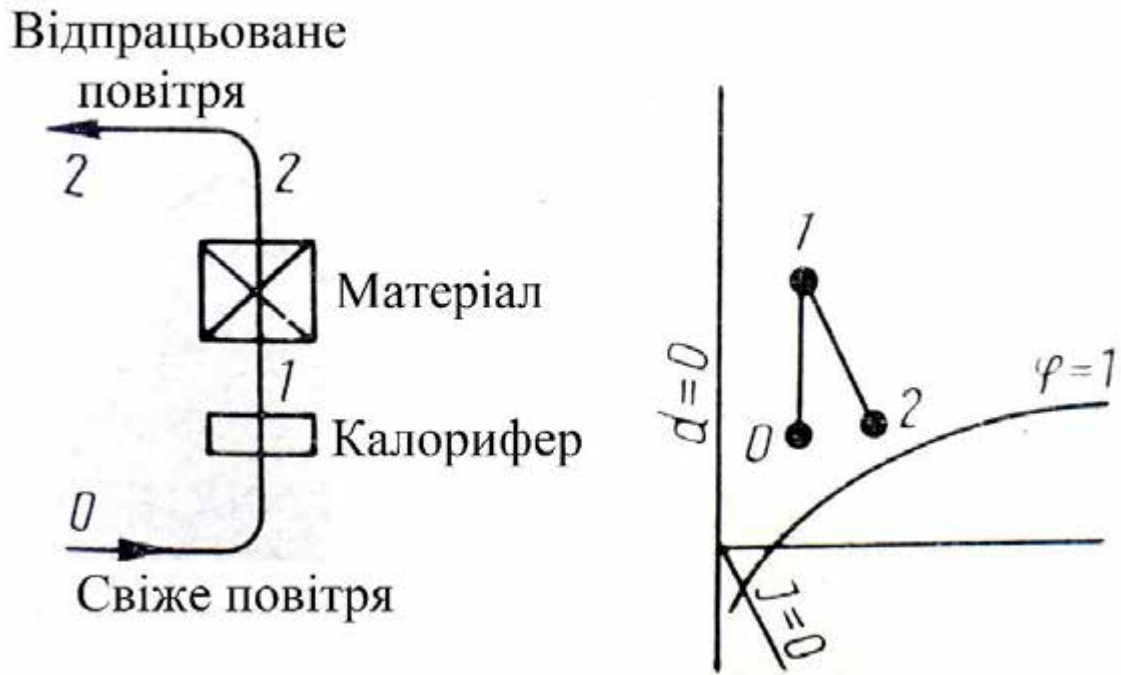


Рисунок 5.1. Принципова схема повітряної сушарки з однократною циркуляцією повітря [14]

У повітряній сушарці з багатократною циркуляцією (рис.5.2) повітря у стані 1 надходить до висушуваного матеріалу і випаровує з нього вологу. Процес випаровування відображається на  $Id$  – діаграмі нагрівання відрізком 1-2 ( $I=const$ ). Відпрацьоване повітря у стані 2 частково викидається у атмосферу, значна частина його змішується із свіжим повітрям (на  $Id$  – діаграмі процес змішування показано відрізком 0-2). Отримана суміш у стані 3 нагрівається в калорифері, в результаті чого (на  $Id$  – діаграмі процес нагрівання показано відрізком 3-1) відновлює свої параметри, з якими подається знову у штабель для повторного циклу.

Такі сушарки є значно економічними, дають можливість гнучкого регулювання процесу – стан повітря, що надходить до штабелю може змінюватися за рахунок зміни ступеню нагрівання повітря у калорифері та кратності повітрообміну.

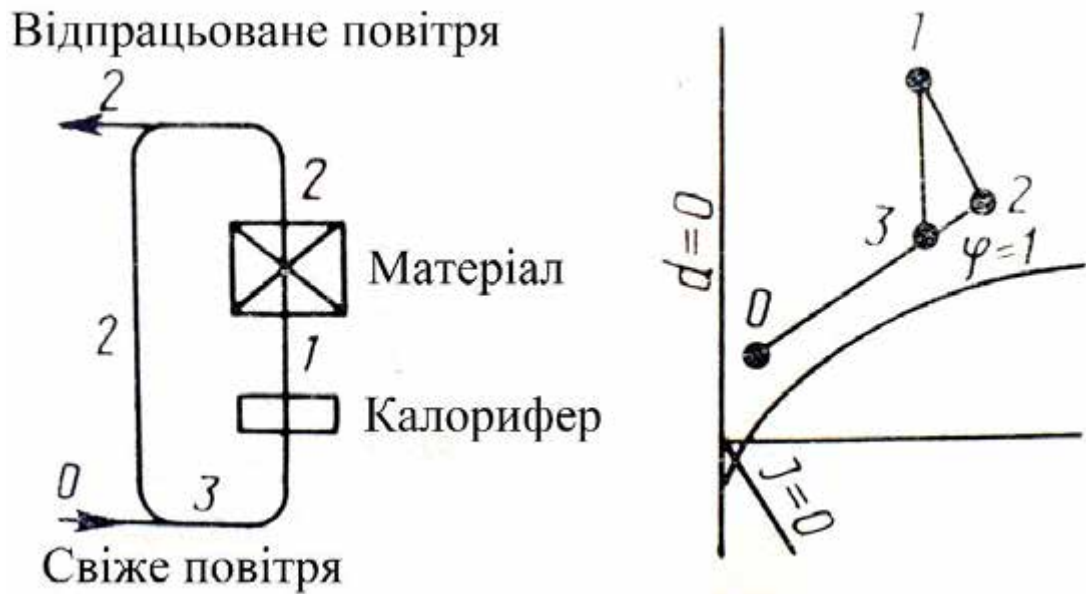


Рисунок 5.2 Принципова схема повітряної сушарки з багатократною циркуляцією повітря [14]

У конденсаційній сушарці (рис.5.3) повітря послідовно проходить крізь калорифер, висушуваний матеріал і конденсатор (теплообмінний апарат, у якому насичене вологою відпрацьоване повітря охолоджується і конденсується відібрана із матеріалу волога). Повітря у стані 1 надходить до штабелю, проходить крізь нього, зберігаючи постійний тепловміст  $I=const$  і виходить із штабелю у стані 2. Потім у конденсаторі охолоджується спочатку при сталому вологовмісті  $d=const$  (відрізок 2-3), а після досягнення температури точки роси вологовміст стає змінним, тому що процес супроводжується конденсацією (процес характеризує лінія 3-4, що збігається із лінією  $\varphi=1$ ). Виходячи з конденсатора у стані 4 повітря нагрівається в калорифері до первісного стану 1. Процес проходить за сталого вологовмісту  $d=const$ . Свіже повітря у камеру не подається і відпрацьоване – не викидається.

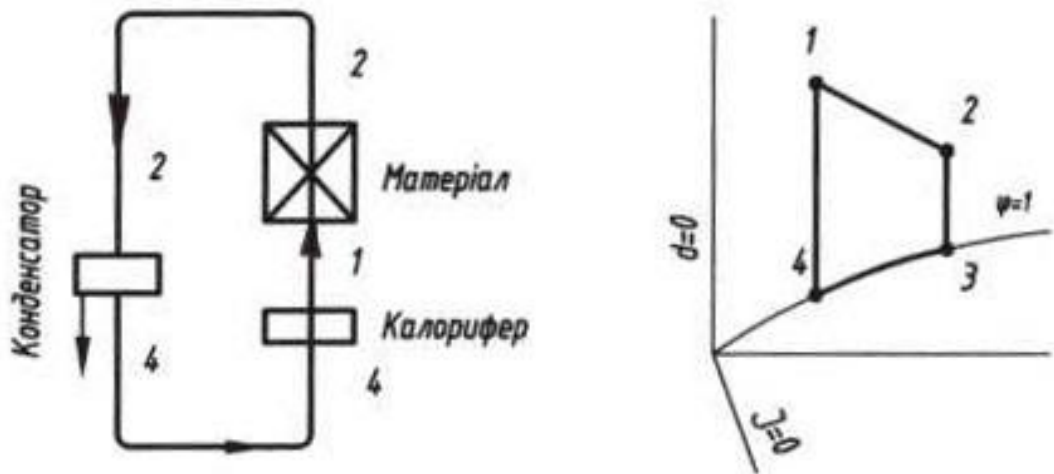


Рисунок 5.3. Принципова схема конденсаційної сушарки

Особливістю газових сушарок є те, що у них відсутні калорифери. Основним тепловим пристроєм у них є топка, з якої топковий газ подається безпосередньо у сушарку.

Газ, що виходить із топки у сушарках з однократною циркуляцією (рис.5.4) має стан  $T$  і змішується із свіжим повітрям у стані  $0$ . На  $Id$  – діаграмі суміш характеризує точка  $1$ . У такому стані газоповітряна суміш надходить в сушарку, де випаровує вологу з матеріалу (лінія  $1-2$ ). Відпрацьована суміш  $2$  повністю викидається в атмосферу. Така сушарка є неекономічною. Відсутня можливість широкого регулювання процесу, стан вхідного повітря визначається параметрами точки, що лежить тільки на лінії  $0-T$ .

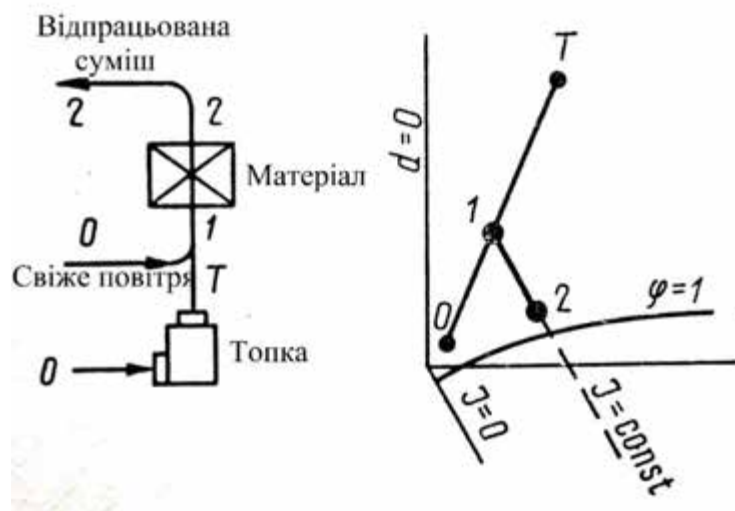


Рисунок 5.4. Принципова схема газової сушарки з однократною циркуляцією повітря [14]

У газовій сушарці з багатократною циркуляцією (рис.5.5) присутнє додаткове обладнання – камера змішування, у якій змішуються три компоненти: атмосферне повітря, гарячий газ з топки та відпрацьована газоповітряна суміш. Процес одночасного змішування цих компонентів можна розглядати як два послідовні процеси, а саме змішування топкового газу із свіжим повітрям та додавання у отриману суміш відпрацьованого агенту.

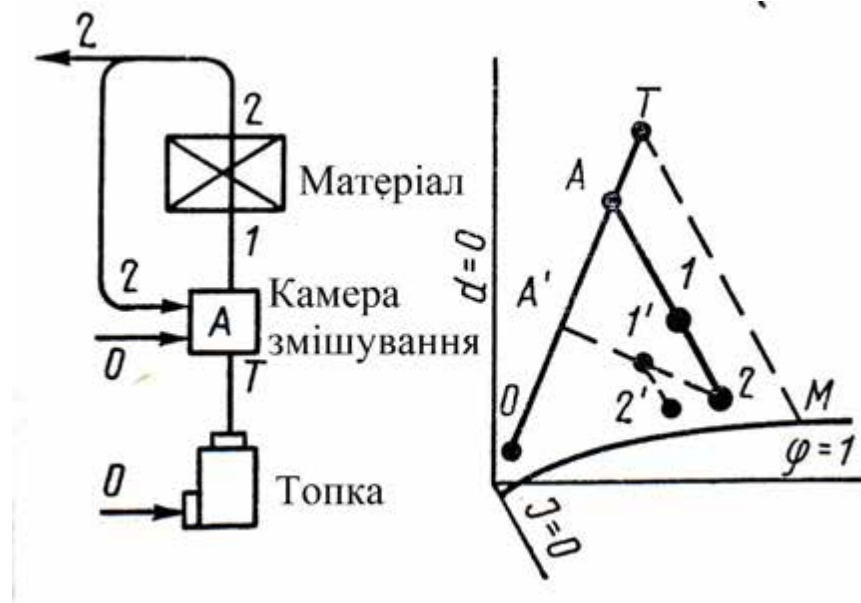


Рисунок 5.5 Принципова схема газової сушарки з багатократною циркуляцією повітря [14]

На  $Id$  – діаграмі процес виглядає наступним чином: топковий газ станом  $T$  змішується з атмосферним повітрям (лінія  $0-T$ , точка  $A$ ), потім до цієї суміші додається відпрацьований сушильний агент у стані  $2$  (лінія  $A-2$ , точка  $1$ ). Отримана газоповітряна суміш у стані  $1$  подається до висушувача матеріалу, з якого випаровує вологу (лінія  $1-2$ ). Для відновлення стану вхідного повітря необхідно змішувати топкові гази із свіжим повітрям у тій самій пропорції. Якщо змінити пропорційність (точка  $\acute{A}$ ), поновлення первісного стану робочої суміші стане неможливим (точка  $\acute{1}$ ). Ця сушарка є більш економічною за попередню. Її конструкція дозволяє широко регулювати процес. За рахунок зміни пропорцій змішування можна отримати суміш будь-якого стану у зоні, що обмежена площею  $0-T-M$ .

Більшість сушарок, що використовуються на підприємствах працюють за вищенаведеними принциповими схемами.

## 5.2. Витрати теплоти на сушіння

Одною з основних вимог, що висуваються до сушарок – це економічність їхньої роботи, тобто необхідно мінімізувати витрати теплоти на проведення процесу сушіння. Ці витрати складаються з витрат на випаровування вологи, на нагрівання матеріалу та на тепловтрати крізь огороження сушарки.

При визначенні витрат теплоти на випаровування вологи у сушарці враховують лише витрати тієї теплоти, що надається сушильному агенту зовні від встановлених у сушарці калориферів (процес атмосферного сушіння без штучного нагрівання повітря характеризується нульовою витратою теплоти). Ці витрати можуть визначені по стану агенту, що підводиться до сушарки та відводиться з неї.

У повітряній сушарці витрати теплоти визначаються наступним чином. Параметри стану свіжого повітря (рис.5.2) позначені як  $I_0$  –тепловміст і  $d_0$  – вологовміст після випаровування вологи із висушуваного матеріалу набувають таких значень –  $I_2, d_2$ . Проходячи крізь сушарку повітря (1 кг за масою його сухої частини), поглинає  $(d_2 - d_0)$  г вологи. Таким чином, кількість повітря, необхідного для віддалення з сушарки 1 кг вологи, становить  $1000/(d_2 - d_0)$  кг. У свою чергу, приріст тепловмісту, тобто кількості теплоти, що витрачається на підігрівання 1 кг повітря у сушарці дорівнює  $(I_2 - I_0)$  кДж(кг)<sup>-1</sup>. Отже, питомі витрати теплоти на випаровування вологи,  $q_v$ , кДж(кг)<sup>-1</sup>, у сушарці можна визначити наступним чином:

$$q_v = (I_2 - I_0) \frac{1000}{d_2 - d_0}. \quad (5.1)$$

У конденсаційній сушарці витрати теплоти на випаровування вологи теоретично дорівнюють 0, тому що теплота, виділена під час конденсації, використовується для підігрівання збезводненого сушильного агента.

У газовій сушарці для сушіння використовується суміш у стані А і приріст її тепловмісту порівняно із атмосферним повітрям визначається різницею  $(I_A - I_0)$ , відповідно:

$$q_v = (I_A - I_0) \frac{1000}{d_2 - d_A}. \quad (5.2)$$

На  $Id$  – діаграмі питомі витрати теплоти можна визначити графічним способом (рис.5.6). Для цього знаходять точки, що відповідають повітрю у стані 0 та 2, з'єднують їх. Потім із початку координат  $Id$  – діаграми проводять промінь паралельній лінії 0-2. Витрату теплоти знаходять по показах кутової шкали.

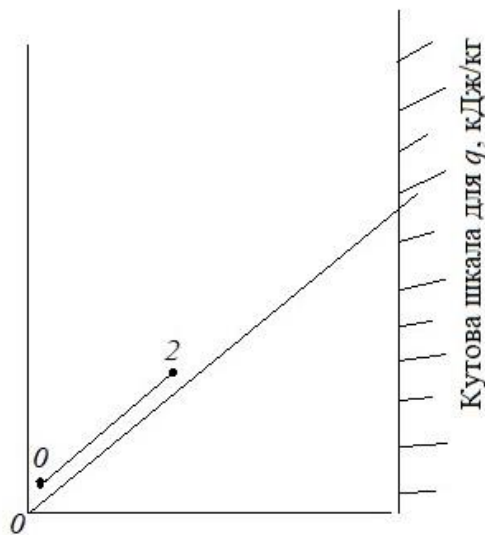


Рисунок 5.6. Схема графічного визначення питомих витрат теплоти у повітряній сушарці

Формули 5.1 і 5.2 показують повні витрати теплоти на випаровування вологи у сушарках, які включають підігрівання свіжого повітря і підігрівання рідкої вологи перед випаровуванням. Як правило, висушуваний матеріал спочатку прогрівають до температури, що відповідає першому етапу сушіння,  $t_{c1}$ . Витрати тепла на випаровування вологи таким чином зменшуються на величину  $c_{\text{в}} t_{c1} = 4,19 t_{c1}$ , кДж(кг) $^{-1}$ .

Економічність безпосередньо сушильного процесу в різних сушарках є неоднаковою. Найбільш економічними є конденсаційні сушарки. Декілька меншою є економічність повітряних сушарок. На останньому місці – газові.

Це видно із суміщених графіків процесів у повітряних (суцільні лінії) та газових (пунктирні лінії) сушарках за однакових станів свіжого повітря (точка 0), а також повітря, що входить у штабель (точка 1) і виходить з нього (точка 2) – рис.5.7. За таких умов множники у рівняннях 5.1 і 5.2 для визначення витрат теплоти на випаровування вологи є рівними, тому що  $I_A = I_2$ . Відповідно, знаменник у рівнянні 5.1 для повітря є більшим (тому що меншим є вологовміст свіжого повітря) за знаменник в рівнянні 5.2 для (вологовміст суміші є великим, а волого поглинаюча спроможність меншою). Звідти видно, що витрати теплоти на випаровування вологи у газових сушарках є більшими приблизно на 25%.

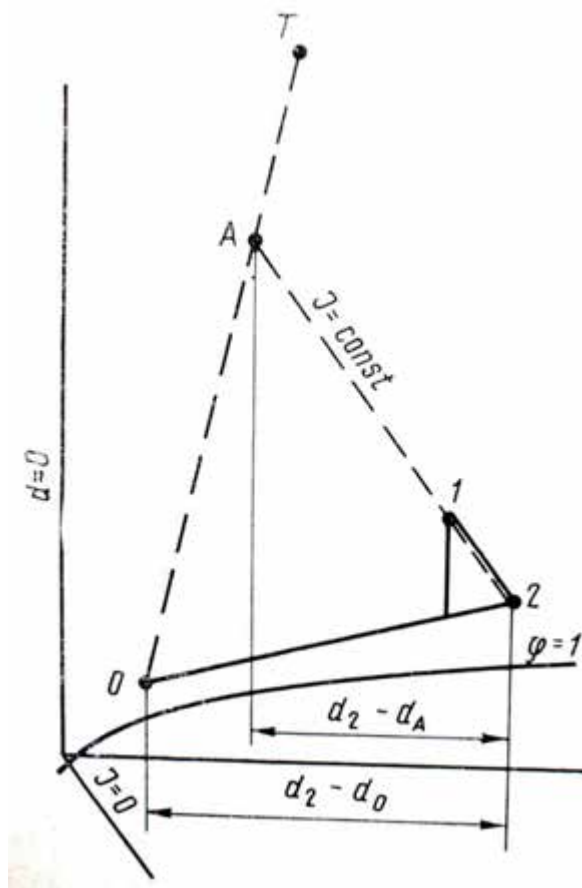


Рисунок 5.7. Зіставлення графіків процесів у повітряній та газовій сушарках [14]

Позитивні моменти використання газових сушарок – менші інвестиції внаслідок відсутності калориферів; повне використання топкового газу. Негативні моменти – складність довільного зменшення газообміну із

зовнішнім середовищем та підтримування безпечного режиму сушіння із високим ступенем насичення сушильного агенту.

Питомі витрати на нагрівання одиниці об'єму деревини,  $q_{н\ 1м^3}$ , кДж(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>, визначаються за формулою:

$$q_{н\ 1м^3} = \rho \cdot c_{(-)} \cdot (-t_{п.з.}) + \rho_б \frac{W_{п}-W_{з.п.}}{100} \cdot \gamma + \rho \cdot c_{(+)} \cdot t_{н} , \quad (5.3)$$

де  $\rho$  – щільність деревини за початкової вологості  $W_{п}$ , %, кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>;

$\rho_б$  – базова щільність деревини, кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>;

$W_{з.п.}$  – кількість незамерзлої вологи у деревині, %;

$\gamma$  – прихована теплота плавлення льоду  $\gamma = 335$  кДж(кг)<sup>-1</sup>;

$c_{(-)}$ ,  $c_{(+)}$  – середня питома теплоємність деревини відповідно за від'ємної і позитивної температурах, кДж(кг · °С)<sup>-1</sup>;

$t_{п.з.}$  – початкова температура деревини для зимових умов, °С;

$t_{н}$  – температура деревини при її прогріванні, °С.

Питомі витрати теплоти на нагрівання, віднесені до 1 кг випареної вологи, кДж(кг)<sup>-1</sup> визначають за формулою:

$$q_{н\ 1кг} = \frac{q_{н\ 1м^3}}{m} , \quad (5.4)$$

де  $m$  – кількість випареної вологи з одиниці об'єму деревини, кг(м<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>:

$$q_{н\ 1кг} = \rho_б \frac{W_{п}-W_{к}}{100} , \quad (5.5)$$

де  $W_{к}$  – бажана кінцева вологість деревини після сушіння, %.

Втрати теплоти на втрати через огороження в одиницю часу,  $Q_{ог}$ , кВт, визначають користуючись рівняннями 3.5 і 3.6 теплопередачі через стінку:

$$Q_{ог} = q \cdot F , \quad (5.6)$$

де  $F$  – площа огорожень, м<sup>2</sup>.

Питомі втрати на 1 кг випареній вологи,  $q_{ог}$ , кДж/кг, визначають за:

$$q_{ог} = \frac{Q_{ог}}{M_c} , \quad (5.7)$$

де  $Mc$  – кількість вологи, що випаровується в сушарці за 1 с, тобто міцність сушарка по випареній воді.

Питомі витрати теплоти на сушіння,  $q_{\text{суш}}$ , кДж(кг)<sup>-1</sup>, у цілому становлять:

$$q_{\text{суш}} = (q_{\text{н}} + q_{\text{в}} + q_{\text{ог}})B, \quad (5.8)$$

де  $B$  – коефіцієнт, що враховує витрати теплоти на початкове нагрівання камери, транспортних засобів, обладнання тощо (приймається  $B=1,1 \dots 1,3$ ).

Практично питомі витрати теплоти на сушіння у повітряних та газових сушарках знаходяться у межах від 3500 – 4000 кДж(кг)<sup>-1</sup> до 7000 – 8000 кДж(кг)<sup>-1</sup>. У конденсаційних камерах споживання енергії становить – 2700 кДж(кг)<sup>-1</sup>, що значно менше витрат у збірно-металевих камерах періодичної дії.

### 5.3. Типи сушильних камер та їх обладнання

Для сушіння пиломатеріалів застосовують переважно конвекційні сушарки, які називають сушильними камерами. Камери – це будівлі різних розмірів, всередині яких розміщені висушувані штабелі пиломатеріалів або заготовок, що завантажуються через спеціальні двері. Всередині камер, а іноді зовні, розташовані вузли теплового і циркуляційного обладнання. У кожній сушарці можна виділити чотири основні групи обладнання: огороження, циркуляційне та теплове обладнання, транспортні пристрої. Теплове і циркуляційне обладнання монтується із стандартних елементів, огороження і транспортне обладнання є специфічним для кожного типу сушарки.

За характером огорожень камери поділяються на стаціонарні та збірні (рис.5.8). Стаціонарні камери – це будівлі, елементи огорожень яких формують на місці із звичайних будівельних матеріалів. Збірні – виготовляють на спеціальних заводах і монтують на місці будівництва із готових панелей та секцій.



Рисунок 5.8. Конвекційні сушильні камери: а – стаціонарні; б – збірні

Елементами огорожень сушарок є підлоги, стелі, стіни, ворота (для завантаження і розвантаження висушуваного матеріалу) та оглядові двері . Вони повинні мати малу теплопровідність, бути довговічними та герметичними.

Підлога має чотири шари: баластний (ущільнений ґрунт) – 200-250 мм; підготовчий (щебінь) – 60 мм; шар бетону – 120 мм; верхній шар (цемент) – 20 мм. У камерах із рейковим шляхом, на шпали кладуть рейки в один рівень з підлогою.

Стіни стаціонарних камер формують із звичайних будівельних матеріалів: цегла керамічна на цементному розчині марки М-50 із повним заповненням швів. Для зовнішніх стін товщина становить 2,5 цеглини (630-640 мм); для внутрішніх, що виходять у опалювальні приміщення, - 2 цеглини (510 мм); стіни між камерами мають товщину 1,5 цеглини (380 мм). Стіни штукатурять лише всередині. Можливо використовувати конструкцію стін не лише із цеглин, ай комбінувати з рівних матеріалів (рис.5.9). товщину яких розраховують за формулою 3.6.

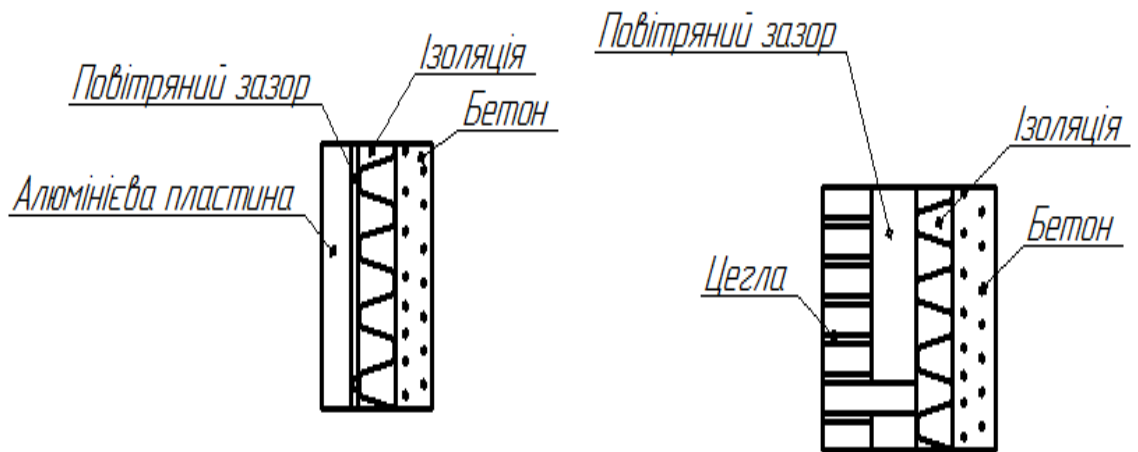


Рисунок 5.9. Варіанти конструкцій стін стаціонарних сушарок

Перекрыття стель стаціонарних сушильних камер – виконують із залізобетонних плит товщиною 70-100 мм зверху яких наносять волого непроникаючий шар бітумної мастики (нафтовий бітум/ уайтспіріт – як 55/45 за масою) і вкривають толю. Перекрыття утеплюють шаром шлаку (250-350 мм) або пінобетону чи іншими тепло ізолюючими матеріалами – рис.5.10.

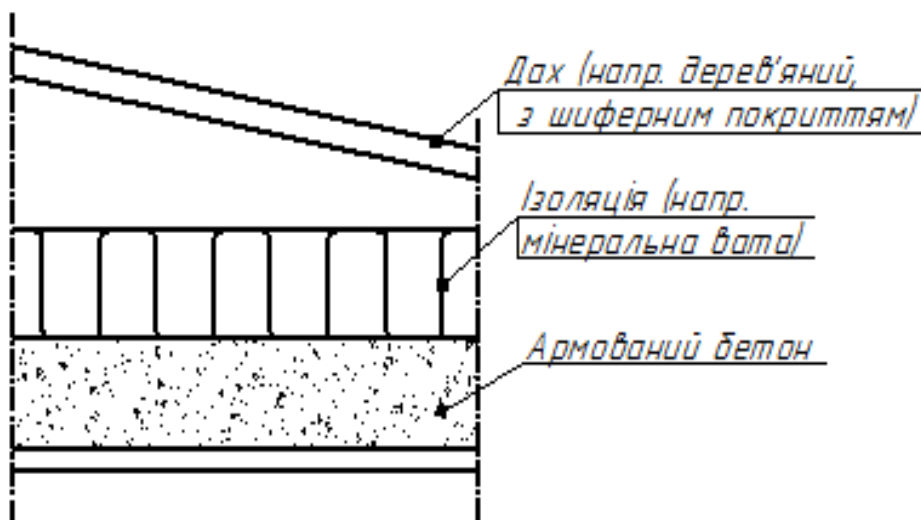


Рисунок 5.10. Варіант конструкційного оформлення перекрыття стаціонарних сушарок

Для підвищення герметичності огорожень зсередини їх покривають фарбами або емаллями на основі пентафталевих та епоксидних смол; личкують листами алюмінію  $AlMg_3$  або нержавіючої сталі із поєднанням швів зварюванням.

Огородження збірних камер виготовляють у вигляді панелей та секцій. Основа конструкції камер має бути виконана з суцільнотягнутих балок і профілів (рис.5.11), виготовлених зі сплаву високої міцності  $AlMg_3$  товщиною 6 мм– 8 мм. Така товщина профілів забезпечує протидію вітровим та сніговим навантаженням, а використання сплаву алюмінієво-магнієво сплаву  $AlMg_3$  сприяє стійкості до дії шкідливого випаровування кислот з деревини.



Рисунок 5.11. Несучі конструкції збірних сушарок

Корпуси камер виготовляють суцільнометалевими з алюмінію та (або) нержавіючої сталі, а стінки виконують у вигляді касет, які заповнені теплоізоляційним матеріалом (рис.5.12). У якості теплоізоляції використовують поліуретанову піну, пінополістірол, мінеральну вату, поліуретан, скловолокно. Внутрішню стінку касети виготовляють із гладкого листа нержавіючої сталі або зі сплаву  $AlMg_3$  товщиною 2 мм, зовнішню обшивку – з профільованого алюмінієвого листа товщиною 1 мм. Утеплювач укладають у касети під час монтажу так, щоб його волокна були орієнтовані

вертикально. Це виключає осідання теплоізоляційного матеріалу і втрату теплоізоляційних властивостей. Товщина теплоізоляційного матеріалу може коливатися від 80 мм до 120 мм (можливо до 250 мм) залежно від регіону встановлення камери. У місцях з'єднання касет використовують прокладки із твердого силікону. Конструкція елементів касети забезпечує герметичність по всьому периметру, вільну циркуляцію повітря усередині неї, що є додатковим захистом від конденсату та виключає виникнення теплових мостів. Коефіцієнт теплопередачі огорожень (3.5) не повинен перевищувати  $K \leq 0,6 \text{ Вт (м}^2 \cdot \text{°C)}^{-1}$ .

Для з'єднання елементів конструкцій використовують неіржавіючі болти з антифрикційними гайками, що запобігають ослабленню з'єднання. Таким чином підвищується жорсткість конструкції.



Рисунок 5.12. Елемент стінки сушарки із теплоізоляцією

Універсальні варіанти конструкцій сушильних камер, використання уніфікованих елементів конструкцій дозволяє компонувати камери модулями для сушіння пиломатеріалів від кількох до тисяч метрів кубічних матеріалу.

Популярність збірних сушарок пояснюється не лише швидкістю встановлення та запуску, можливістю їх демонтажу та перевезення на іншу територію із наступним монтажем, але й добудовою упритул до інших камер – рис.5.13.



Рисунок 5.13. Компонування сушильних камер

Ворота для завантаження та розвантаження висушеного матеріалу повинні бути герметичними у стулках, мати надійні і прості запори та стабільну форму. Як правило, це металеві двері з каркасом із профільного металу (алюмінію або сталі). Конструкцію воріт камер повинна бути виготовлена із спеціальних суцільнотягнутих профілів. Усередині воріт знаходиться термоізоляція, аналогічна теплоізоляції стін. Як ущільнювач використовують профіль з гуми, стійкої до дії низьких і високих температур.

Найбільш широке застосування мають стулкові двері (рис.5.14 а). Такі двері можуть бути одно- та двостулковими є ефективними для невеликих камер, у які висушуваний матеріал завантажується на візках по рейках. Багато стулкові ворота ( від 3-х до 6-ти стулок) призначені для великих широких камер, де завантаження висушеного матеріалу може відбуватися на візках або автозавантажевачем – рис.5.14 б. Управління стулковими воротами камерами відбувається вручну. Також ручне управління мають зсувні щитові ворота – рис.5.14 в.

У деяких сушарках застосовують підйомно-відкатні ворота (рис.5.14 г). Вони пересуваються за допомогою каретки, що рухається по монорельсу і мають ручне або автоматизоване управління. За рахунок власної ваги та

накладанню на огороження камери такі ворота забезпечують гарне щільне закриття отвору.

У підйомно-щитових воріт (рис.5.14 д) полотно переміщується вертикально по напрямних за допомогою тросової лебідки і фіксується у верхньому положенні стопорним пристроєм. Такі ворота застосовують для великих просторових камер шириною до 14 м.

Підйомно-шторкові двері мають дверне полотно, що складається із кілька щитків шарнірно зв'язаних між собою (рис.5.14 е). Для притиску щита воріт використовують противагу. Такі ворота, як і підйомно-щитові мають лише автоматизоване управління.



Рисунок 5.14. Варіанти воріт сушильних камер

Для контролю стану висушуваного матеріалу та датчиків вимірювання параметрів сушильного агенту і вологості деревини збірні камери комплектуються оглядовими дверима, що розміщені із тильного боку – рис.5.15.



Рисунок 5.15. Конструкція оглядових дверей

Циркуляцію повітря у камерах забезпечують переважно осьові вентилятори, які розміщені усередині камер. Динамічно збалансовані крильчатки вентиляторів із лопатями симетричного профілю можуть бути відлиті під тиском з алюмінієвого сплаву (рис.5.16.) або з поліаміду чи поліпропілену на основі скловолокна. Переважно використовують крильчатки діаметром 510, 610, 790, 1010 мм, які забезпечують швидкість повітряного потоку від  $1,5$  до  $3,0 \text{ м(с)}^{-1}$  залежно від товщини та породи висушуваного матеріалу. Вентилятори комплектуються електродвигунами у тропічному виконанні із класом ізоляції Н, тобто витримують температурний режим близько  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  і вологість повітря  $100 \%$ . Потужність використовуваних

електродвигунів знаходиться у межах 0,55 – 5,5 кВт залежно від об'єму завантаження камери. Потік повітря протягом процесу сушіння може змінювати напрям (час реверсування залежить від породи і розмірів пилопродукції).

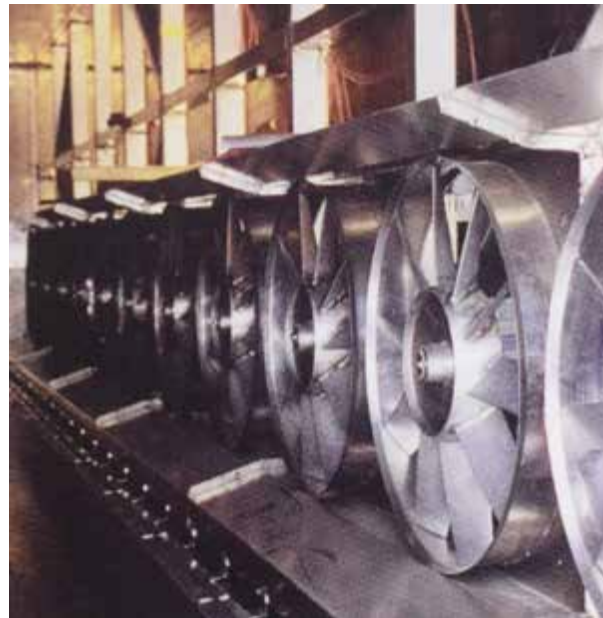


Рисунок 5.16. Осьовий вентилятори: *а* – вентилятори з алюмінієвого сплаву італійської фірми “O.S.Panto”; *б* – блок осьових вентиляторів, розташованих у камері німецької фірми “Brunner-Hildebrand”

Заміну відпрацьованого повітря у камері можуть забезпечувати циркуляційні вентилятори (рис.5.16) через припливно-витяжні комини, які встановлюють на стелі (рис.5.17 а) або на стінах (рис.5.17 б) камери. Таким чином всередині камери створюються зони підвищеного та зниженого тиску, що сприяє викиду вологого повітря та подачі свіжого. Комини виготовляють із алюмінієвого сплаву і обладнують поворотними заслінками для регулювання кількості повітрообміну. У великогабаритних камерах у вентиляційні комини встановлюють додаткові вентилятори примусової заміни повітря (рис.5.17 в).



а



б



в

Рисунок 5.17. Комини для вентиляції камер: а – розміщені на даху; б – розміщені на стінах; в – обладнані вентиляторами

Для економії теплової енергії камери можуть обладнувати камери рекуператорами, які запобігають викиду теплової енергії назовні (рис.5.18). У спеціальному пристрої до камери відпрацьоване повітря подається у теплообмінник, через який проходить свіже повітря. Таким чином, енергія відпрацьованого сушильного агенту використовується для підігрівання припливного повітря. Це дає можливість зберегти до 30 % теплової енергії.



Рисунок 5.18. Загальний вигляд рекуператору теплоти у камері

Для нагрівання сушильного агенту використовують спеціальні теплообмінні пристрої – калорифери, які передають теплоту йому від теплоносія. Теплоносієм може бути насичена водяна пара, гаряча вода, топкові гази і деякі органічні рідини з високою температурою кипіння. У сучасних промислових сушарках переважно використовують водяні калорифери, теплоносієм у яких є гаряча вода; іноді – електричні, у яких електрична енергія перетворюється на теплову, а теплоносієм є провідники з високим омичним опором. Раніше більш популярними були парові калорифери, теплоносієм у яких використовувалась насичена водяна пара.

Водяний і паровий калорифери складаються із замкненої системи металевих паро- або водопроводів. Зовні цю систему омиває циркулюючий сушильний агент, а всередині – гаряча вода температурою  $90^{\circ}\text{C}$ , перегріта вода температурою  $115^{\circ}\text{C}$  або насичена водяна пара під тиском  $0,6\text{ МПа}$ . У випадку парового калорифера вся пара повинна сконденсуватися, щоб віддати свою приховану теплоту пароутворення.

В сушарках використовують калорифери, що збирають із стандартних труб (рис.5.19 а) або пластинчасті калорифери (рис.5.19 б) заводського виконання.



а

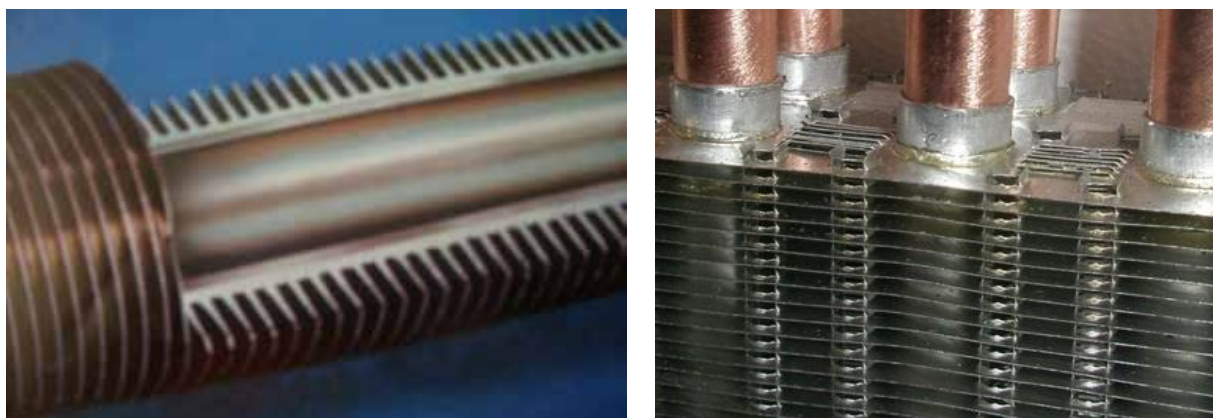


б

Рисунок 5.19. Калорифери сушильних камер: а- збірний з стандартних труб; б- пластинчастий

Для монтажу збірних калориферів зараз використовують біметалеві труби із спіралью-накатним ребрами. Для цього можуть використовувати поєднання мідних труб та алюмінієвих ребр (рис.5.20 а) Проте, поєднання «мідь-алюміній» сприяє підтіканню радіаторів внаслідок електрохімічної корозії контактів міді з нержавіючими трубами, що підводять теплоносій.

Калорифери із труб з нержавіючої сталі та ребрами із алюмінієвого сплаву, більш стійкі до корозії від агресивного середовища сушарки, мають добре розвинену поверхню нагрівання (рис.5.20 б).



а

а

Рисунок 5.20. Елементи біметалевих калориферів: а– мідні труби і алюмінієві ребра; б– нержавіюча труба і алюмінієві ребра

Пластинчасті калорифери поділяються за числом трубок – на одно-, дво-, три- та чотирьохрядні. Розмір калорифера характеризується його номером. Перевагою пластинчастих калориферів є компактність за великої поверхні нагрівання, значна інтенсивність тепловіддачі. До недоліків відноситься швидкість засмічення порошком, та великий опір руху сушильного агенту.

У сучасних камерах переважно використовують збірні калорифери з нержавіючих труб та алюмінієвими ребрами, які виготовляють під кожну камеру індивідуально. Коефіцієнт теплопередачі їх майже у два рази вищий за пластинчасті калорифери, а термін служби – не менше 6 років.

Для подачі теплоносія у калорифери використовують у якості арматури три- або чотирьохходові розподільні клапани, крани, насоси, фільтри (рис.5.21). Застосування таких вентилів забезпечує швидке регулювання кількості

теплоносія, який подається у камеру за рахунок того, що кут повороту вентиляю складає  $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$  із кроком  $1^{\circ}$  і автоматично регулюється комп'ютерною системою керування.

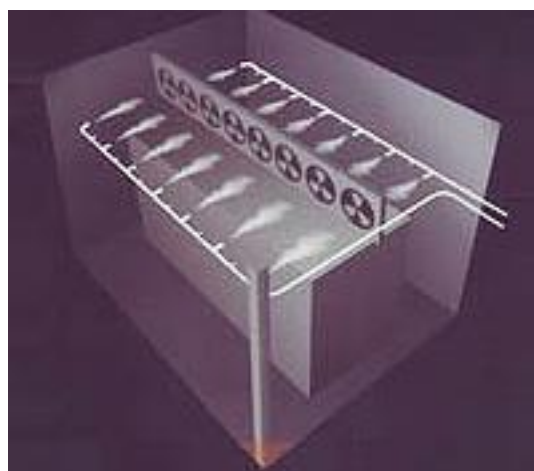


Рисунок 5.21. Трубопроводи та клапани для подачі гарячої води у камери

Зволоження сушильного агенту у сучасних камерах спеціальною системою зрошування водою, яка працює під тиском  $0,15$ - $0,25$  МПа. Система складається із розподільних нержавіючих труб із латунними форсунками для розбризкування води (рис.5.22 а). Витрата води для зрошування  $1 \text{ м}^3$  деревини становить близько  $0,08 \text{ л (год)}^{-1}$ . Розміщують форсунки таким чином, щоб краплі води не попадали на висушуваний матеріал, тобто розбризкування води повинно бути у потоці повітря (рис.5.22 б).



а



б

Рисунок 5.22. Елементи системи зволоження сушильного агенту: а – форсунка; б–схема розміщення форсунок у камері

Комплексна система управління камерою включає:

- електророзподільний щит;
- силові і інформаційні кабелі, прокладені в спеціальних закритих жолобах;
- датчики для вимірювання температури, відносної вологості повітря в камері і вологості матеріалу;
- індивідуальний для кожної камери блок-перетворювач сигналів датчиків;
- виконавчі механізми для систем опалювання, зволоження, повітрообміну;
- персональний комп'ютер, що управляє процесом сушіння (може бути загальним для всіх камер).

Для створення необхідної температури у сушарках найчастіше використовуються опалювальні котли на твердому паливі. Вони поділяються на такі групи:

- Традиційні твердопаливні котли;
- Газогенераторні (піролізні) дров'яні котли;
- Котли тривалого горіння;
- Котли для спалювання пелет.

Традиційні твердопаливні котли за своєю конструкцією нагадують звичайну піч з вікном для подачі палива, топкової і димоходу. Паливом для традиційного твердопаливного котла може бути як вугілля, так і деревина. Закладання палива у такі котли здійснюється до 3-4 рази на день. Під час їх роботи утворюється зола, яку регулярно необхідно прибирати. Основним елементом традиційного твердопаливного котла є теплообмінник, який забезпечує передачу теплоносія теплової енергії. Вважається, що термін служби котла залежить від терміну служби теплообмінника. Звідси очевидно, що теплообмінник повинен бути виготовлений з довговічного матеріалу. Зазвичай твердопаливні котли виготовляють з чавуну або сталі (рис. 5.23 а).

Перевагою традиційного твердопаливного котла є відсутність електронних плат, автоматики та систем управління, які у першу чергу виходять з ладу. Єдиним пристроєм автоматизації є регулятор температури, який працює за механічним принципом, тому традиційний твердопаливний котел є не лише універсальним, але і надійним, здатним довгий час пропрацювати без поточного ремонту. Проте, без своєчасного чинення котла знижується його продуктивність і його перегрів, що призводить до передчасного виходу з ладу.

Піролізні котли мають більш високий коефіцієнт корисної дії (ККД) порівняно із традиційними котлами (рис.5.23 б). В основу їх роботи покладений принцип піролізного спалювання, суть якого полягає в тому, що під дією високої температури і в умовах нестачі кисню суха деревина розкладається на летючу частина – так званий піролізний газ і твердий залишок – деревне вугілля. Піролізний котел складається з двох камер – паливного бункеру та камери згоряння, розташованих одна над іншою.

До переваг піролізних котлів можна віднести повне згоряння палива, економічність горіння, економію палива, регульований процес горіння із закладанням палива 2 рази на добу, процес горіння піролізних газів легко піддається управлінню і регулюванню, що дозволяє автоматизувати їх роботу.

До недоліків піролізних котлів можна віднести більш високу ціну, у порівнянні з традиційними твердопаливними котлами, залежність від електроенергії, що звужує застосування даного виду котлів або зажадає додаткових вкладень для придбання генератора на рідкому паливі, для підтримки роботи котла за відсутності подачі електроенергії.

Котли тривалого горіння (котел верхнього горіння) є різновидом твердопаливних котлів, у яких подача повітря і процес горіння обмежуються верхньою частиною паливного шару. Така схема дозволяє завантажувати в топку одночасно значну кількість палива, але вони вимагають більш складного обслуговування.



Рисунок 5.23. Твердопаливні котли: а – традиційний; б – піролізний

Конструктивно котел складається з двох частин – один всередині іншого, між якими знаходиться нагрівається вода. У циліндричній топці котла можуть спалювати дрова, стружку, тирсу, брикети, гранули та вугілля. Топка розташована зверху, тому рівномірно горять не всі закладені дрова, а лише верхня частина топки. Дрова, що знаходяться у нижній частині котла не нагріваються і «довго чекають своєї черги» для нагрівання і горіння. Таким чином, твердопаливний котел тривалого горіння максимально економічно витрачає паливо, дозволяючи досягти високих показників ККД (рис.5.24а).

Перевагою твердопаливних котлів тривалого горіння є тривалий період горіння без до закладання палива, що дозволяє працювати у автономному режимі. До недоліків можна віднести відносно високу вартість у порівнянні з традиційними твердопаливними котлами; залежність від споживання електроенергії; підвищені вимоги до вологості і розмірів шматків палива; складність розпалювання при неповному завантаженні внаслідок т дуже глибокої топки; неможливість довантаження у процесі роботи дрібного палива типу тирси.

Котли для спалювання пелет за своєю суттю мало чим відрізняються від традиційних твердопаливних котлів. Основна відмінність полягає в тому, що пелетний котел крім камери згоряння, забезпечений спеціальним бункером і

автоматикою для подачі палива (рис.5.24 б). Після підключення до системи опалення та електропостачання і завантаження бункера паливом (пелетами) такий котел зможе протягом тривалого часу працювати без участі людини. До переваг цих котлів можна також віднести високий ККД, широкий діапазон регулювання. Недоліком пелетних котлів є висока вартість, регулярна потреба у специфічному виді палива та залежність від споживання електроенергії.



Рисунок 5.24. Твердопаливні котли: а – тривалого горіння; б – пелетний

До основних транспортних операцій у сушильному цеху відносяться: підвезення пиломатеріалів на місце формування пакетів; формування пакетів; завантаження пакетів у штабелі в камері і вивантаження з них; перевезення пакетів на склад сухих пиломатеріалів, розформування пакетів; подання сухих пиломатеріалів в цех наступної обробки або на склад готової продукції.

Кількість пакетів у штабелях камери залежить від її конструкції. В один пакет складають дошки лише однієї породи і товщини. Необрізні дошки складають відземковими частинами у різні сторони. Різні за довжиною дошки складають розбіжно, причому найдовші по краях – це запобігає жолобленню. Стиковані по довжині дошки розміщують не менше, ніж на двох перекладках.

Перекладки бувають міжрядові, що розділяють горизонтальні ряди пакету, та міжпакетні, що розділяють пакети у штабелі. Для міжрядових перекладок використовують стругані висушені рейки перетином 20x25 мм.

Міжпакетні – виготовляють зі струганих сухих брусків перетином 75 x 75 мм або 100 x 100 мм.

При формуванні пакету перекладки необхідно укласти одну над іншою, щоб вони утворювали суто вертикальний ряд. Крайні перекладки повинні бути розміщені на одному рівні із торцями дошок – це запобігає жолобленню, провисанню дошок, розтріскуванню торців – рис.5.25. Кількість перекладок по довжині пакету залежить від породи і товщини дошок.



а



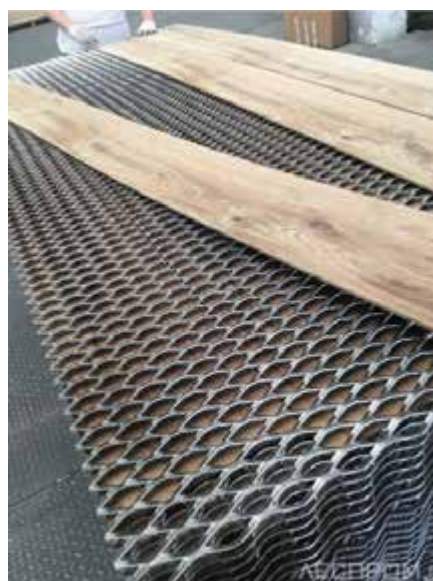
б

Рисунок 5.25. Розміщення перекладок у сушильному пакеті: а – правильне, б – неправильне, що призводить до вищенаведених дефектів

Останнім часом у якості перекладок використовують дерев'яні профільні (рис.5.26 а – середня частина штабелю) або металеві (рис.5.26 а, б).



а



б

Рисунок 5.26. Перекладки для формування сушильного пакету: а – профільовані металеві та дерев'яні, б – металеві для висушування ламелі

Поява забарвлення дубових дошок у місцях зіткнення із дерев'яними перекладками прямокутного або квадратного профілю викликало необхідність пошуку таких перекладок, які б нещільно прилягали до дошок запобігаючи утворенню сприятливої атмосфери для розвитку забарвлюючих грибів. Застосування профільних перекладок обмежило площу їх дотику із поверхнею дошок.

Основним недоліком показаних на рис.5.26а перекладок є необхідність укладання вручну. У разі висушування тонких дошок або ламелі раціонально використовувати спеціальну металеву решітку. У разі автоматичного формування штабелю вона подається роботом під час пошарового укладання. Таке рішення дозволяє значно скоротити час формування пакетів і виключити людський фактор. Основною перевагою алюмінієвої сітки є простота укладання, рівномірний розподіл ваги по площі шару і мінімальне зіткнення ламелей із металевими частинами.

Для формування і розформування сушильних пакетів на потужних підприємствах використовують спеціальні лінії із пакето-формуючою машиною – рис. 5.27., що дозволяють скласти 8-10 шарів сушильного пакету за хвилину. На невеликих підприємствах пакети формують вручну.



Рисунок 5.27. Загальний вигляд лінії формування сушильних пакетів

Сформовані пакети транспортують до сушарок за допомогою навантажувачів (рис.5.28 а) або траверзних візків (рис.5.28 б). У першому випадку використовують навантажувачі, що формують штабелі із пакетів

безпосередньо у камері. Нижній пакет розміщують на підлозі на міжпакетних перекладках. Такий спосіб є актуальним для камер із фронтальним завантаженням.



а



б

Рисунок 5.28. Види завантаження сушарок і штабелями за допомогою:  
а – навантажувача, б – траверзного візка

У разі наявності на підприємствах фронту невеликих за обсягом висушуваного матеріалу камер або тунельних сушарок завантаження штабелів відбувається за допомогою спеціальних кареток по рейках, розташованих у камерах і перед ними. На деяких підприємствах для подачі штабелів використовують траверсні візки, які дозволяють транспортувати штабелі з одного рейкового шляху до іншого. Візок рухається уздовж фронту сушильних камер по трьох або чотирьох нитковому рейковому шляху, укладеному у заглибленні, що називається траверсною траншеєю. Штабель на траверсний візок закатують по рейковому шляху, який знаходиться на її платформі. Рівень рейок цього шляху повинен відповідати рівню рейок, укладених в камерах або складських приміщеннях.

#### 5.4. Конструкції сушильних камер

Сушильні камери для пилопродукції бувають періодичної і безперервної дії. Камери періодичної дії відрізняються багато чисельністю, вони мають одні завантажувальні ворота через які завантажується і розвантажується висушуваний матеріал. Камери безперервної дії являють собою так звані

тунелі, по яких рухається висушуваний матеріал, який завантажується через одні ворота і розвантажується з протилежного боку через інші.

Усі сушарки мають багаторазову циркуляцію агенту сушіння і за характером сушильного агенту поділяються на повітряні та газові. Серед запропонованих на ринку сушильних камер 90-95% становлять камери класичного конвекційного типу із різними схемами організації подачі сушильного агенту в штабель пиломатеріалів, системами припливно-витяжної вентиляції та видами теплоносія .

На Україні ще від радянських часів де-не-де залишилися три види сушарок – УЛ (із поперечно-вертикальною циркуляцією повітря по штабелю), СПМ-2К ( із поперечно-горизонтальною циркуляцією) та ПАП (з поздовжньою циркуляцією), для виробництва яких існували відповідні проекти та технічні умови – рис. 5.29. Аеродинамічні камери ПАП зжили себе не лише внаслідок неякісного сушіння, але й через велику собівартість процесу внаслідок використання електрики для підігрівання агенту сушіння. Економічно доцільно випускати та використовувати такі камери лише у тих регіонах, де ціни на електроенергію є низькими.

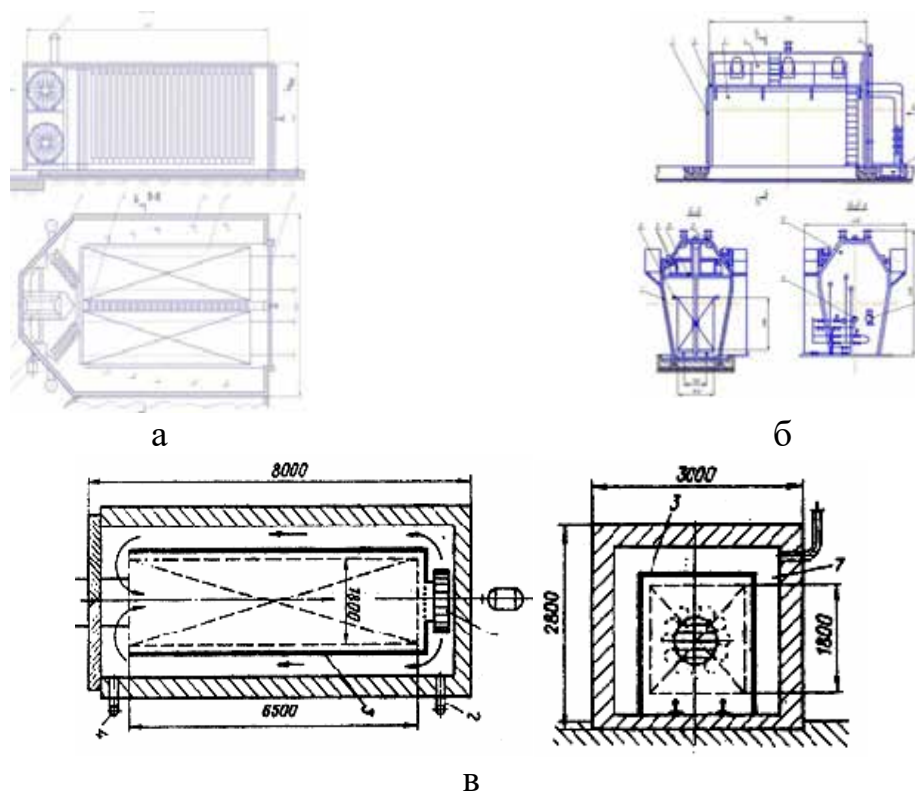


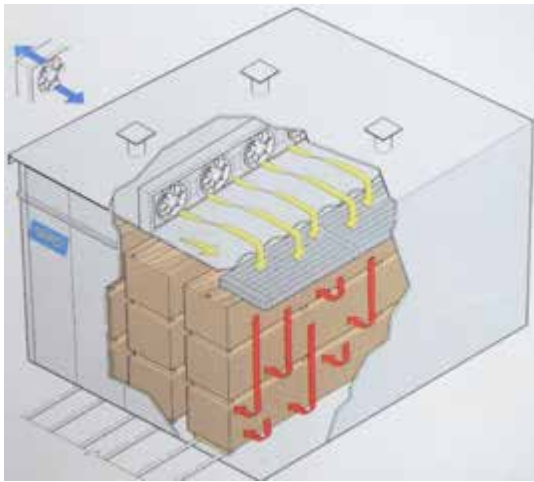
Рисунок 5.29. Схеми сушильних камер: а – УЛ, б – СПМ-2К, в – ПАП

Камери УЛ та СМП-2К – парові сушарки, що випускали у металевому виконанні, а для реалізації цих конструкцій у стаціонарних огороженнях (СПЛК) були типові проекти. Ці камери оснащені осьовими реверсивними вентиляторами з двигунами у загальнопромисловому виконанні, що винесені за межі сушарки за рахунок подовження валу. Така конструкція дозволила розмістити сам вентилятор безпосередньо в камері, але вимагала використання електродвигунів великої потужності (5,5 – 7 кВт). Як теплообмінні агрегати використовувалися оребрені труби (в камерах СПЛК – чавунні) та пластинчасті калорифери (у камерах УЛ).

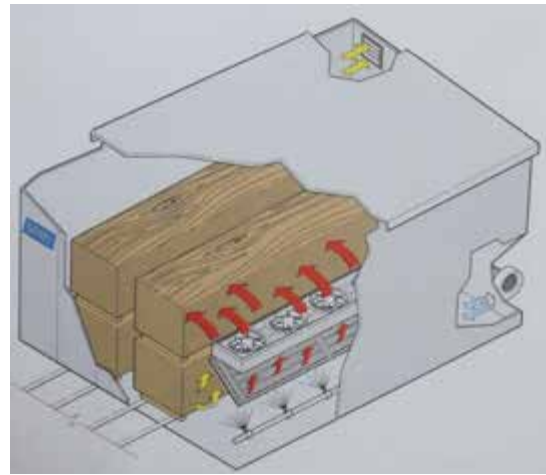
Названі камери користувалися популярністю, незважаючи на деякі недоліки в аеродинамічній схемі, які впливали із прагнення зниження металоємності, більш компактного розташування камер на відведеній під цех території та габаритними обмеженнями під час транспортування металевих огорожень сушарок. Нарікання також викликали громіздка система автоматики, виконуючі механізми на тепловій мережі та припливно-витяжній вентиляції. Деякі модернізовані, а саме переведені на обігрівання гарячою водою, вони і нині працюють на деяких підприємствах.

Останнім часом в технології конвективного сушіння деревини відбулися значні зміни. В сучасних лісосушарках як теплоносій використовується гаряча вода, що підігрівається в котлах-утилізаторах деревних відходів. Відмова від пари пов'язана не лише з бажанням знизити собівартість процесу за рахунок зміни схеми тепlopостачання, але й з підвищенням вимог до виробів з деревини – невисокі температури сушильного агента (до 60 °С) не викликають зниження міцності деревини за будь-якого терміну обробки.

У зв'язку з цим змінилися і режими сушіння – стали більш ощадними, а термін сушіння збільшився. Тому для збереження необхідної продуктивності підприємств почали користуватися попитом камери з більшою завантажувальною місткістю – рис.5.30.



а



б

Рисунок 5.30. Сучасні сушильні камери для пилопродукції із різними схемами циркуляції сушильного агенту: а – із поперечно-вертикальною схемою; б – із поперечно-горизонтальною схемою

Найбільш популярними є збірні камери різної ємності, які широко представлені на вітчизняному ринку багатьма фірмами. Найбільш відомі і розповсюджені сушильні камери італійських фірм: «Incorplan», «Nardi», «Big on Dry», «Sorcal», «Termolegno» «Secea», «Panto»; польських фірм: «LeKo», «Namech», «Luka», «Secomat»; чеських фірм: «Vzduchotechnika», «Katres», австрійської фірми «Mühlböck-Vanisek», українських фірм «Горлуш К°», «Галактик» тощо. Загальна інформація сушарок різних виробників наведена у табл.5.1.

Останнім часом з'явилася зацікавленість у без калориферних камерах, що працюють із прямим обігріванням (рис.5.31), де сушильним агентом виступає суміш газів, утворених під час спалювання деревних відходів із свіжим та відпрацьованим повітрям.



Рисунок 5.31. Модель без калориферної газової сушарки

Такі камери є популярними для висушування хвойних пиломатеріалів товщиною до 40 мм для подальшого використання у якості погонажних виробів. Між тим використання розроблених осцилювальних режимів оброблення [30] дозволяє досягти високої якості сушіння навіть заготовок з деревини дубу товщиною 50 мм.

Таблиця 5.1. Загальна характеристика сушильних камер різних фірм-виробників

Параметри	Фірми-виробники сушильних камер											
	«Mühlböck»	«Copcal»	«Incomplan»	«Termolegno»	«BigonDry»	«Nardi»	«LE.KO»	«Hamech»	«Secomat»	«Katres»	«Vzduchov-technika»	«Горлуш К°»
Наповнювач панелей: - пінополістирол; - мінеральна вата; - поліуретан; - скловолокно	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Теплоносій: - гаряча вода; - пара; - діатермічна олія; - перегріта вода	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Спосіб відчинення дверей: - розсувні; - підйомні; - стулкові; - підйомно-відкатні	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Управління процесом сушіння: - ручне; - напівавтоматичне; - автоматичне	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Спосіб завантаження камер: - поперечний (фронтальний); - поздовжній (тунельний)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Камери безперервної дії відрізняються від камер періодичної дії не лише довжиною, але й принципом регулювання режиму сушіння. У камерах

періодичної дії стан сушильного агенту змінюється у часі, але для кожного заданого моменту на вході у штабель він повинен бути однаковим по усій довжині камери. У камерах безперервної дії стан сушильного агенту змінюється за її довжиною, залишаючись у кожній точці сушильного простору постійним у часі ( рис.5.32).

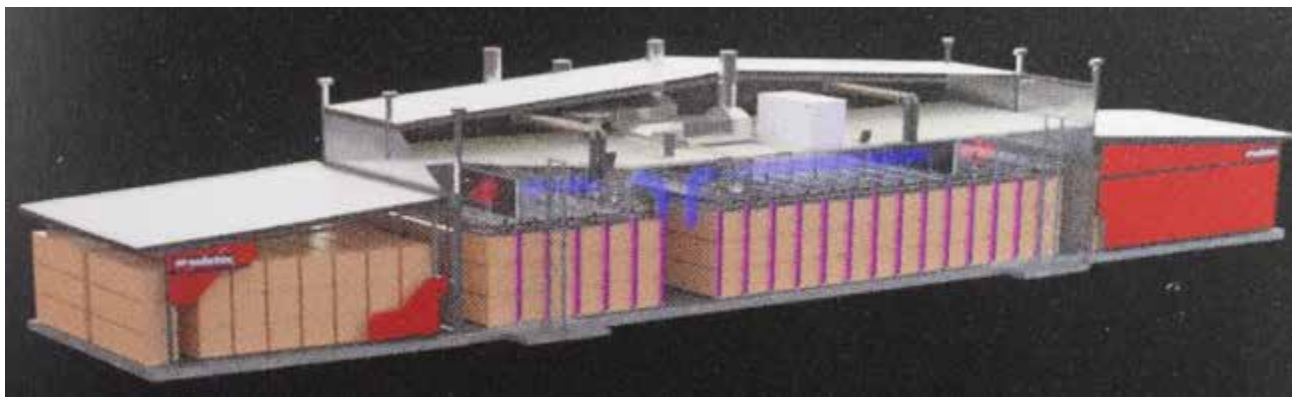


Рисунок 5.32. Схема камери безперервної дії фінської фірми «Valmet»

Сушильні камери безперервної дії знайшли використання на підприємствах великої потужності, що висушують переважно хвойні пиломатеріали товщиною від 15 мм до 50 мм до вологості 18-20%. Такі камери забезпечують високу продуктивність –  $12000 - 28000 \text{ м}^3 (\text{рік})^{-1}$ . У нашій країні такі камери майже не знайшли використання у зв'язку з обмеженістю у сировині.

### 5.5. Планування сушильного цеху

Сушильних цех слід розташовувати по ходу вантажопотоків у загальній схемі підприємств. До того ж камери повинні, за можливості, бути розташованими якнайближче до котельні.

Усі допоміжні та побутові приміщення розташовують виходячи з максимальної зручності та взаємозв'язку приміщень: лабораторію, гардеробні із санвузлами розташовують поруч із коридором управління або котельнею тощо.

Площа сушильного цеху,  $F_{цеху}$ , м<sup>2</sup>, складається із площі камер,  $F_{кам}$  м<sup>2</sup>; коридору управління,  $F_{кор.упр}$ , м<sup>2</sup>; ділянки завантаження,  $F_{д.з}$ , м<sup>2</sup>; складів,  $F_{скл}$ , м<sup>2</sup>; побутових і допоміжних приміщень,  $F_{поб.пр}$ , м<sup>2</sup>:

$$F_{цеху} = F_{кам} + F_{кор.упр} + F_{д.з} + F_{скл} + F_{поб.пр}. \quad (5.9)$$

Площу, зайнятої камерами,  $F_{кам}$ , м<sup>2</sup>, розраховують за формулою:

$$F_{кам} = B \cdot L \cdot n_{кам}, \quad (5.10)$$

де  $B$  – ширина однієї камери (габаритні розміри), м;  $L$  – довжина однієї камери (габаритні розміри), м;  $n_{кам}$  – кількість камер у блоці, шт.

Площа коридору управління,  $F_{кор.упр}$ , м<sup>2</sup>.

$$F_{кор.упр} = B_{кор.упр} \cdot L_{кор.упр}, \quad (5.11)$$

де  $B_{кор.упр}$  – ширина коридору управління, м,  $B_{кор.упр} = 3$  м;  $L_{кор.упр}$  – довжину коридору управління, м, приймають залежно від його місця розташування. Переважно коридор управління з тильного боку уздовж всього блоку камер.

Площа ділянки завантаження,  $F_{д.з}$ , м<sup>2</sup>:

$$F_{д.з} = B_{д.з} \cdot L_{д.з}, \quad (5.12)$$

де  $B_{д.з}$  – ширина ділянки завантаження, м, відповідає довжині штабеля з припуском (0,5 м), також слід враховувати розворот завантажувального транспорту;  $L_{д.з}$  – довжина ділянки завантаження, м, відповідає ширині блоку камер.

Площа складів,  $F_{скл}$ , м<sup>2</sup>:

$$F_{скл} = F_{сир.м} + F_{сух.м}, \quad (5.13)$$

де  $F_{сир.м}$  – площа складу сирого матеріалу, м<sup>2</sup>;  $F_{сух.м}$  – площа складу сухого матеріалу, м<sup>2</sup>.

Розрахунок площі складу сирих матеріалів ведуть з умови, що він повинен забезпечувати безперервну роботу камер і мати запас матеріалу на 2–3 доби. Обсяг матеріалу, який зберігається на протязі доби,  $\Phi_{1\text{ доба}}$ , м<sup>2</sup>(доби)<sup>-1</sup>:

$$\Phi_{1\text{ доба}} = \frac{\Phi}{365}, \quad (5.14)$$

де  $\Phi$  – фактичний обсяг висушеного матеріалу за специфікацією, м<sup>3</sup>.

Кількість штабелів на складі,  $n_{шт}$ :

$$n_{\text{шт}} = \frac{(2\dots3)\Phi_{1\text{доба}}}{E_{\text{шт}}}, \quad (5.15)$$

де  $E_{\text{шт}}$  – місткість штабелю, м<sup>3</sup>.

Площа складу сирих матеріалів:

$$F_{\text{сир.м.}} = b_{\text{шт.}} \cdot l_{\text{шт.}} \cdot \frac{1}{\beta_{\text{скд}}} \cdot n_{\text{шт.}}, \quad (5.16)$$

де  $b_{\text{шт}}$  – ширина одного штабеля, м;  $l_{\text{шт}}$  – довжина одного штабеля, м;  $\beta_{\text{скл}}$  – коефіцієнт заповнення складу штабелями, враховуючи проїзди та протипожежні розриви, приймають  $\beta_{\text{скл}}=0,6\dots0,7$ .

На складі сухих матеріалів пиломатеріали зберігаються 3–5 діб у щільних пакетах, довжина  $l_{\text{пак}}$  яких відповідає довжині найбільшої дошки або заготівки, а ширина,  $b_{\text{пак}}$ , і висота,  $h_{\text{пак}}$ , пакету приймається 0,8...1,0 м.

Площа пакету,  $f_{\text{пак}}$ , м<sup>2</sup>:

$$f_{\text{пак.}} = b_{\text{пак.}} \cdot l_{\text{пак.}} \quad (5.17)$$

Кількість пакетів, шт:

$$n_{\text{пак.}} = \frac{(3\dots5)\Phi_{1\text{доба}}}{E_{\text{пак.}}}, \quad (5.18)$$

де  $E_{\text{пак}}$  – місткість пакету, м<sup>2</sup>, з врахуванням коефіцієнта заповнення  $\beta_{\text{пак}}=0,9$ :

$$E_{\text{пак.}} = b_{\text{пак.}} \cdot l_{\text{пак.}} \cdot h_{\text{пак.}} \cdot \beta_{\text{пак.}} \quad (5.11)$$

Розрахунок площі складу сухих матеріалів:

$$F_{\text{сух.м.}} = f_{\text{пак.}} \cdot \frac{n_{\text{пак.}}}{2 \cdot \beta_{\text{в.}} \cdot \beta_{\text{скд}}}, \quad (5.12)$$

де  $\beta_{\text{в}}$  – коефіцієнт заповнення складу штабелями по висоті залежно від співвідношення висоти штабеля і приміщення,  $\beta_{\text{в}}=1\dots3$ .

До допоміжних приміщень у сушильному цеху відносяться: лабораторія (якщо не поставляється фірмою-виробником разом із сушильними камерами) площею 15–20 м<sup>2</sup>; кімната майстра, площею 8–10 м<sup>2</sup>. До побутових приміщень належать: гардеробні, вбиральні і умивальники, кімната відпочинку.

## 5.6. Контрольні запитання

1. Зв якими ознаками поділяють сушарки?
2. На які види поділяють сушарки за ознаками?
4. Чим відрізняються принципові схеми повітряних сушарок із різною циркуляцією?
5. Чим відрізняються принципові схеми газових сушарок із різною циркуляцією?
6. Які особливості принципової схеми роботи конденсаційних сушарок?
7. З чого складаються витрати теплоти на сушіння?
8. Як визначають витрати теплоти у повітряних, газових та парових сушарках?
9. Що таке сушильна камера і за якими видами їх поділяють?
10. Що відноситься до основних елементів обладнання сушильних пристроїв?
11. Чим відрізняється будова огорожень стаціонарних та металевих камер?
12. Які різновиди воріт (дверей) застосовують у сушарках?
13. Що відноситься до теплового обладнання сушарок?
14. Як зволожують сушильний агент у конвекційних сушарках?
15. Що таке вентилятори і які типи використовуються в сушарках?
16. Які типи калориферів використовують у сушарках?
17. Як формують та транспортують сушильні пакети у камери?
18. Які бувають сушарки за принципом дії і чим вони відрізняються?
19. Які існують різновиди сушарок за видом кільця циркуляції сушильного агенту?
20. Які приміщення необхідно враховувати під час планування сушильного цеху?

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shamira Hamir Structural Timber Design to Eurocode 5. 2007 [https://www.academia.edu/32636292/Structural\_Timber\_Design\_to\_Eurocode]
2. Технологія та обладнання виробництва пилопродукції / Пінчевська О. О., Коваль В. С., Сірко З. С., Марченко Н. В. К. : Освіта У країни, 2013. 648 с.
3. Станко Я. Н. , Горбачева Г. А. Древесные породы и основные пороки древесины. Иллюстрированное пособие для работников таможенной службы. М. : Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2010. 155 с.
- 4 Вади деревини та дефекти обробки. Терміни та визначення [Текст]: ДСТУ 2152-93. – [Чинний від 1993-07-01]. К: Держстандарт України, 1993. – 48с. – (Національні стандарти України).
5. Уголев Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение М. : ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. 351 с.
6. Dzbenski W., Kozakiewicz P., Wiktorski T. Sortowanie tarcicy ogolnego przeznaczenia. Warszawa : SGGW, 2007. 100 p.
7. Вінтонів І. С., Сопушинський І. М., Тайшингер А. Деревинознавство Львів : РВВ УкрДЛТУ, 2005. 252 с.
8. Patrick Perre', Roger B. Keey. Drying of Wood: Principles and Practices. Handbook of Industrial Drying : Canada, 2014. – P.822-872
9. Kozakiewicz P. Fizyka drewna w teorii i zadaniach. Warszawa: SGGW, 2012. 152 p.
10. Connors T. Hardwood dry kiln operation. Manual for operators of small dry kilns. Department of Forestry, University of Kentucky 2000 [http://www2.ca.uky.edu/agcomm/pubs/FOR/FOR128/FOR128.pdf]
11. Skaar C., Simpson W. T. Thetmodynamocs of water sorption by wood. Forest Products Journal, – 1968. – 18(7). – P.49–58.
12. Ребиндер П. А., Влодавец И. Н. Физико-химическая механика пористых и волокнистых структур. Проблемы физико-химической механики волокнистых и пористых структур и материалов, –1967. – С. 5–43

13. Лісоматеріали та пилопродукція. Методи визначення вологості: ДСТУ 4922:2008. – [Введ. 2008–22–01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 7 с.
14. Серговский П. С., Расев А. И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. – М. : Лесн.пром-сть, 1987. 360 с.
15. Шубин Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М. : Лесн.пром-сть, 1990. 336 с.
16. Чудинов Б. С. Вода в древесине. – Новосибирск : Наука, 1984. 267 с.
17. Пилопродукція. Визначання радіального і тангенціального усихання: ДСТУ 4920:2008. – [Чинний від 2009-07-01]. К: Держстандарт України, 2009. – 30с. – (Національні стандарти України).
18. Denig J., Wengert E. M., Simpson W. T. Drying Hardwood Lumberю Gen.Tech.Rep.FLP-GTR—118.Madison, WI:U.S.Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2000. 138 p.
19. Dobrowolska E., Kurowska A. Wybrane zagadnienia z hydrotermicznej obrobki drewna w zadaniach. – Warszawa. : SGGW, 2016. 103 p.
20. Кречетов И. В. Сушка древесины. Изд. 2-е переработ. и доп. М. : Лесн.пром-сть, 1972. – 440 с
21. ОДЕК: досвід поколінь, втілений у продукції : веб-сайт. URL: [https://odek.eu/ua/manufacture\\_uk/](https://odek.eu/ua/manufacture_uk/)
22. Переробка сировини. Укршпон : веб-сайт. URL: <http://ukrshpon.com/ru/produktion/lohnmesserung.html>
23. Dzurenda L., Deliiski N. Tepelne procesy v technologiach spracovania dreva. Zvolen : TUZVO, 2010. 273 p.
24. Пропарочные камеры Mühlböck-Vanisek : веб-сайт. URL: <http://www.mbt.ru/drying-kilns-steam/>
25. Шубин Г. С. Проектирование установок для гидротермической обработки древесины. М. : Лесн пром-сть, 1983. 272 с.
26. Білей П. В., Кунинець Є. П., Соколовський І. А. та ін. Теорія теплової обробки деревини. Львів: ЗУКЦ, 2012. 200 с.

27. Чудинов Б.С. . Теория тепловой обработки древесины. М. : Наука, 1968. 255 с.

28. Bois, P. J. The four stages of drying thick oak. In: Wengert, E. M.; Toennisson, R., eds. Lumber drying sourcebook: 40 years of practical experience. Pub. 7274. Madison, WI: Forest Products Society. 371 p.

29. Уголев Б. Н., Лапшин Ю. Г., Кротов Е. В. Контроль напряжений при сушке древесины. М. : Лесн. Пром-сть, 1980. 206 с.

30. Пінчевська О. О., Спірочкін А. К., Борячинський В. В. Прискорене сушіння заготовок з деревини дуба. К. : ЦП «Компринт», 2018. 144 с.

# ДОДАТКИ

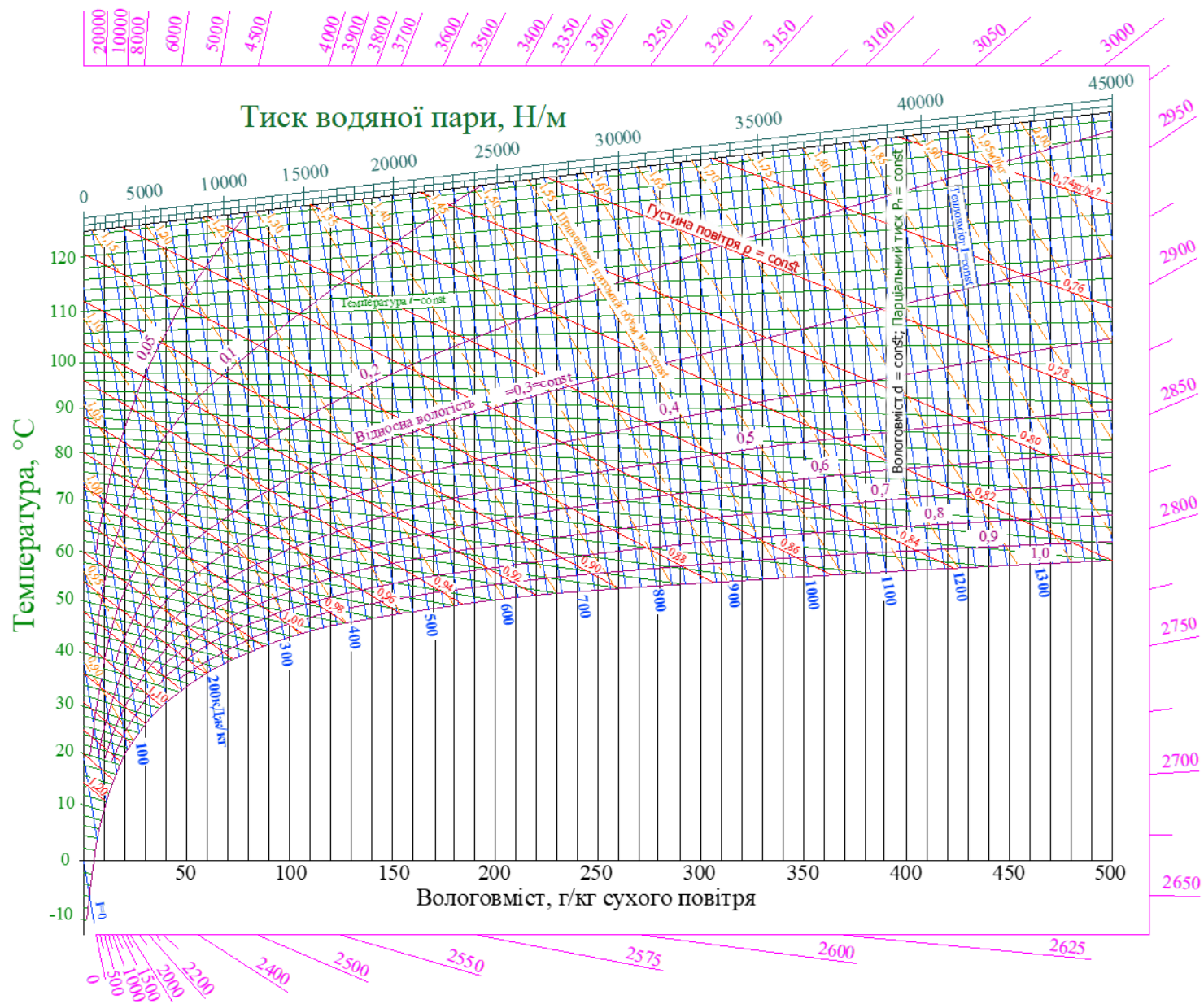


Рисунок А1.  $Id$ -діаграма вологого повітря [20]



Таблиця А1. Ступінь насичення сушильного агенту за показами психрометра φ, %

Температура сушильного агенту, °С	Психрометрична різниця, t, °С																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
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
48	100	95	90	84	79	74	70	65	61	57	52	49	46	42	39	36	33	30	27	24	22
50	100	95	90	84	79	75	70	66	62	58	54	50	47	44	41	37	34	31	29	26	24
52	100	95	90	84	80	75	71	67	63	59	55	51	48	45	42	38	36	33	30	27	25
54	100	95	90	84	80	76	72	68	64	60	56	52	49	46	43	39	37	34	32	29	27
56	100	95	90	85	81	76	72	68	64	60	57	53	50	47	44	41	38	35	33	30	28
58	100	95	90	85	81	77	73	69	65	61	58	54	51	48	45	42	39	36	34	31	29
60	100	95	90	86	81	77	73	69	65	61	58	55	52	49	46	43	40	37	35	32	30
62	100	95	91	86	82	78	74	70	66	62	59	56	53	50	47	44	41	38	36	33	31
64	100	95	91	86	82	78	74	70	67	63	60	57	54	51	48	45	42	39	37	34	32
66	100	95	91	86	82	78	75	71	67	63	60	57	54	51	49	46	43	40	38	35	33
68	100	95	91	87	82	78	75	71	68	64	61	58	55	52	49	46	44	41	39	36	34
70	100	96	91	87	83	79	76	72	68	64	61	58	55	52	50	47	44	41	39	37	35
72	100	96	91	87	83	79	76	72	69	65	62	59	56	53	50	47	45	42	40	38	36
74	100	96	92	87	84	80	76	72	69	65	63	60	56	53	51	48	46	43	41	39	37
76	100	96	92	87	84	80	77	73	70	66	64	61	57	54	52	49	47	44	42	40	38
78	100	96	92	88	84	80	77	73	70	66	64	61	58	55	53	50	48	45	42	40	38
80	100	96	92	88	84	80	77	73	70	66	64	61	58	55	53	50	48	45	43	41	39
82	100	96	92	88	84	80	77	74	71	67	65	62	59	56	54	51	49	46	44	42	40
84	100	96	92	88	84	80	77	74	71	68	65	62	59	56	54	51	49	46	44	42	40
86	100	96	92	88	84	80	78	75	72	69	66	63	60	57	55	52	50	47	45	43	41
88	100	96	92	89	85	81	78	75	72	69	66	63	60	57	55	52	50	48	46	44	42
90	100	97	93	89	85	81	79	75	72	69	66	63	61	58	56	53	51	49	47	45	43
92	100	97	93	90	86	82	79	76	73	70	67	64	62	59	57	54	52	50	47	45	43
94	100	97	93	90	86	82	79	76	73	70	67	65	62	60	57	54	52	50	48	46	44
96	100	97	93	90	87	83	80	76	73	70	68	65	62	60	58	55	53	51	48	46	44
98	100	97	93	90	87	83	80	77	74	71	68	65	63	60	58	55	53	51	49	47	45
100	100	97	93	90	87	83	80	77	74	71	68	66	63	61	59	56	54	52	49	47	45
102			94	91	88	84	81	78	75	72	69	67	64	62	59	56	54	52	50	48	46
104				88	84	81	78	75	72	69	67	64	62	60	57	55	53	50	48	46	46
106					81	78	75	72	69	67	64	62	60	57	55	53	50	48	46	46	46
108						75	72	69	67	64	62	60	57	55	54	51	49	46	46	46	46
110							69	67	65	63	61	58	56	54	51	49	46	46	46	46	46

Таблиця А.2. Залежність тиску насичення водяної пари від температури  $P_n=f(t)$ 

Температура, °С	Тиск $P_n$ , Па	Температура, °С	Тиск $P_n$ , Па
0	327,84	52	13613,2
2	705,27	54	14998,7
4	813,26	56	16505,3
6	934,59	58	18145,1
8	1073,24	60	19918,3
10	1227,89	62	21838,1
12	1402,55	64	23904,6
14	1598,53	66	26144,4
16	1817,18	68	28557,6
18	2063,82	70	31157,4
20	2338,47	72	33943,8
22	2649,77	74	36956,9
24	2983,75	76	40187,3
26	3361,05	78	43636,3
28	3779,68	80	47342,6
30	4242,31	82	51315,6
32	4754,26	84	55568,6
34	5319,55	86	50144,9
36	5940,83	88	64941,1
38	6619,44	90	70100,7
40	7375,37	92	75593,6
42	8199,30	94	81446,4
44	9104,50	100	101822,4
46	10086,80	110	143255,5
48	11160,38	120	198506,2
50	12333,60	130	263074,9