



ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ СУШІННЯ ДЕРЕВИНИ

Рівняння тривалості сушіння.
Внутрішні напруження в деревині, закономірності їх утворення

Важливою задачею для практики сушіння є визначення терміну сушіння деревини до потрібної кінцевої вологості за відомого стану сушильного агента.

Низькотемпературний процес

Початкова вологість $W_p < W_{MH}$

Термін сушіння (без початкового прогрівання) може бути визначений на базі закону вологопровідності. Задача формулюється аналогічно задачі нагрівання (охолодження) твердого тіла у повітрі.

Зміна вологовмісту у будь-якій точці одновимірного тіла протягом часу описується рівнянням:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a' \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

за граничних умов III роду:

$$a' \frac{\partial u}{\partial x} = -\alpha' (U_{\text{вн}} - U_{\text{д}})$$

де α' – коефіцієнт **вологообміну**;

$U_{\text{пов}}$, $U_{\text{р}}$ - вологовміст поверхні деревини та рівноважна вологість деревини.

Наближене рішення цього рівняння відносно терміну сушіння необмеженої пластини товщиною S ($S = 2R$) до середньої кінцевої вологості W_k за умов рівномірно розподіленої за перетином початкової вологості W_n приводить до формули:

$$\tau = \frac{S^2}{\pi^2 a'} \left(1 + \frac{\pi^2 a'}{2\alpha' S} \right) \ln \left(B \frac{W_n - W_p}{W_k - W_p} \right)$$

яка через безрозмірні критерії записується у вигляді:

$$\tau = \frac{S^2}{\pi^2 a'} \left(1 + \frac{\pi^2 a'}{4Bi} \right) \ln \left(B \frac{1}{\theta} \right)$$

де $Bi = \frac{\alpha'R}{a'}$ - вологообмінний критерій Біо;
 θ - безрозмірна вологість (аналог безрозмірної температури в процесах теплообміну), що визначається із співвідношення:

$$\theta = \frac{W_{\kappa} - W_p}{W_n - W_p}$$

B – параметр, величина якого залежить від критерію Bi :

Bi	1	2	4	8	12	20	30	50	∞
B	0,99	0,96	0,93	0,89	0,87	0,85	0,84	0,83	0,81

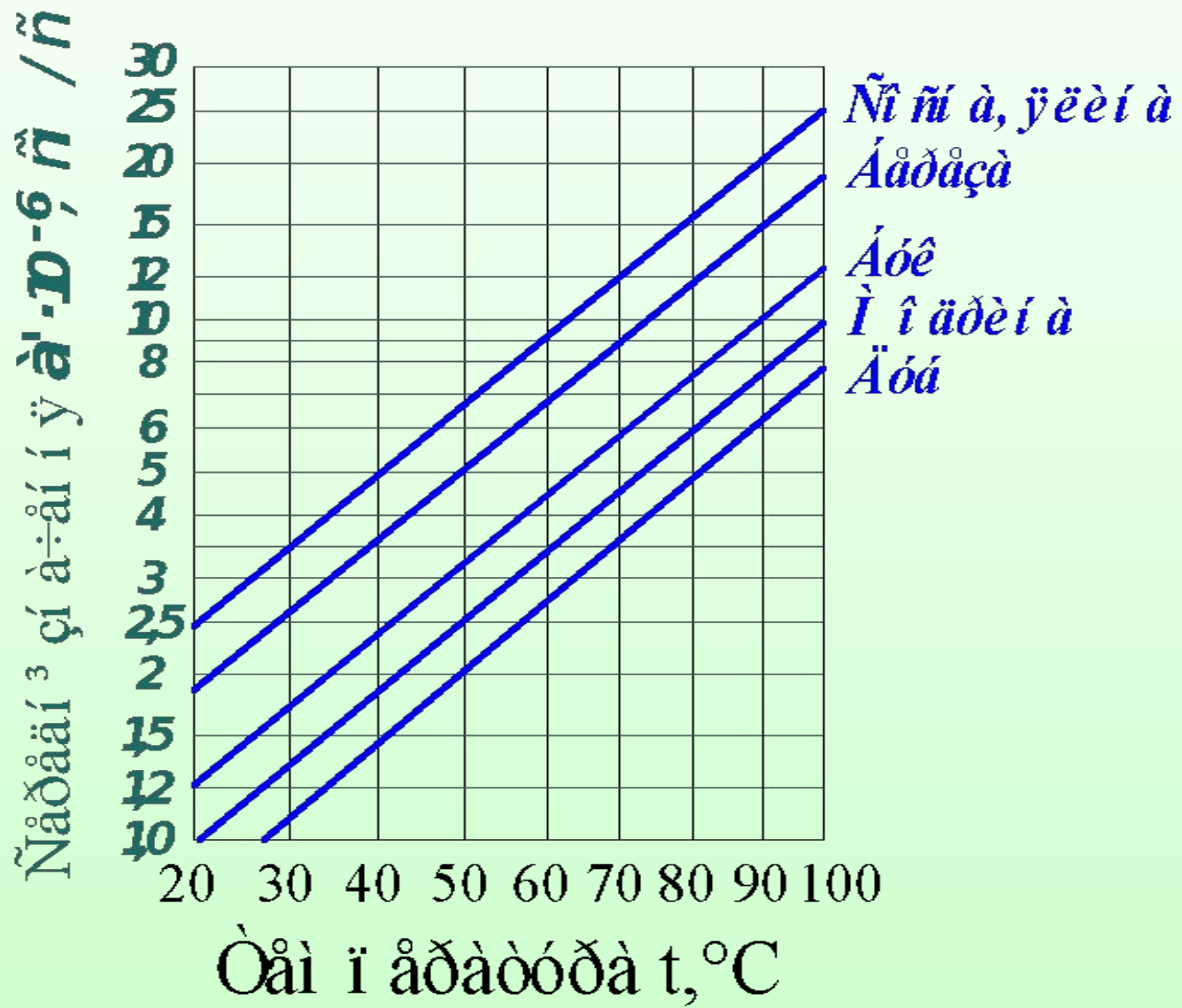
Для розрахунків по цих рівняннях **коефіцієнт вологопровідності**, що залежить від базової густини та температури, визначається з діаграми для розрахункових (усереднених між тангенціальним і радіальним напрямками та різними зонами стовбура) коефіцієнтів вологопровідності деревини головних промислових порід і вимірюється в $\text{см}^2/\text{с}$.

Коефіцієнт вологообміну залежить від ступені насиченості, швидкості циркуляції та температури сушильного агенту, визначається за діаграмою і вимірюється в $\text{см}/\text{с}$.

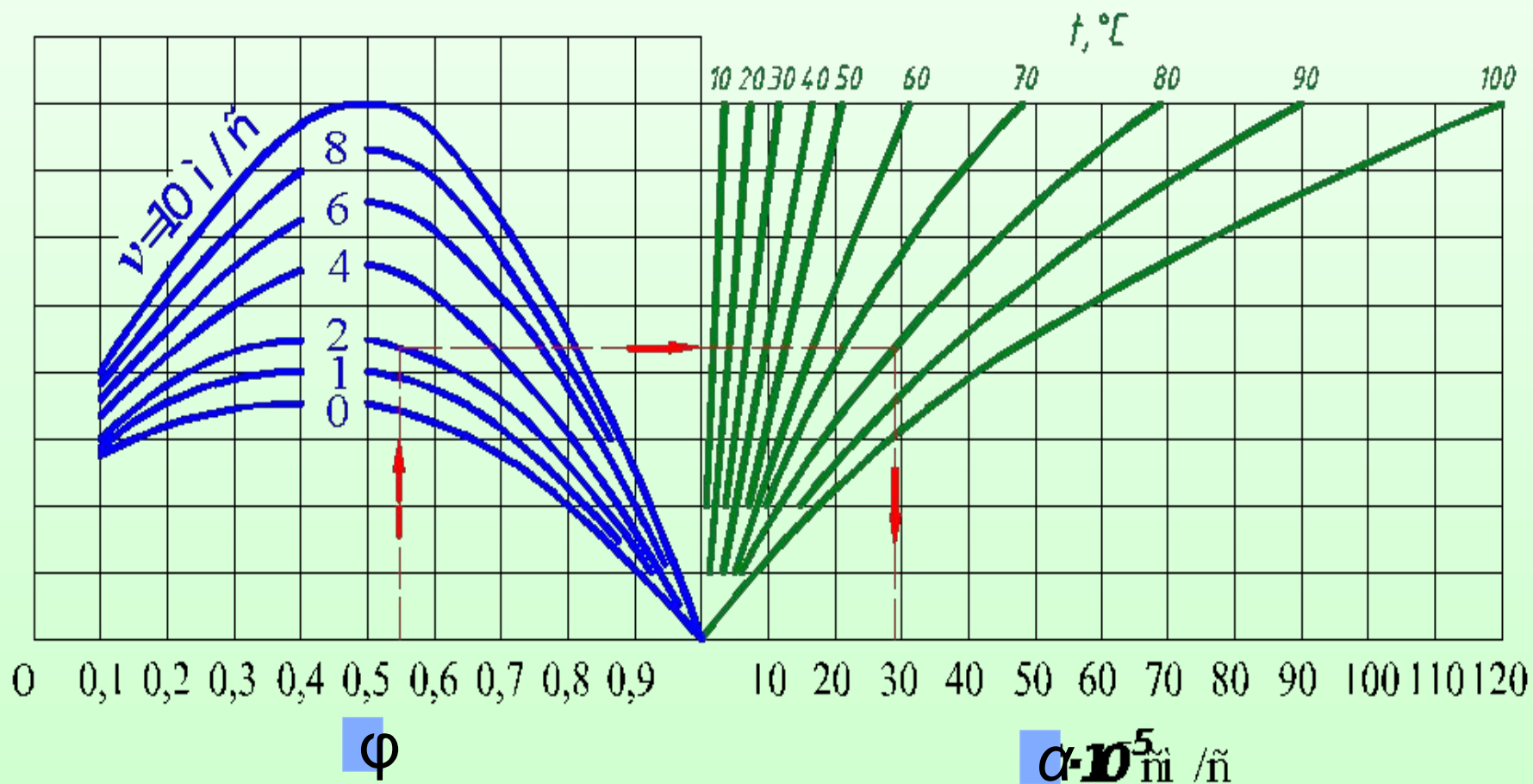
Для застосування запропонованих рівнянь, що виведені для необмеженої пластини, треба враховувати багатомірність сортименту. Для цього підставляють у формулу значення **товщини** сортименту, а отриманий результат помножують на коефіцієнт c_τ (з відповідної діаграми для співвідношення товщини до ширини S_1/S_2), що враховує двомірність дошки або заготовки:

$$\tau_{np} = c_\tau \tau_{S_1}$$

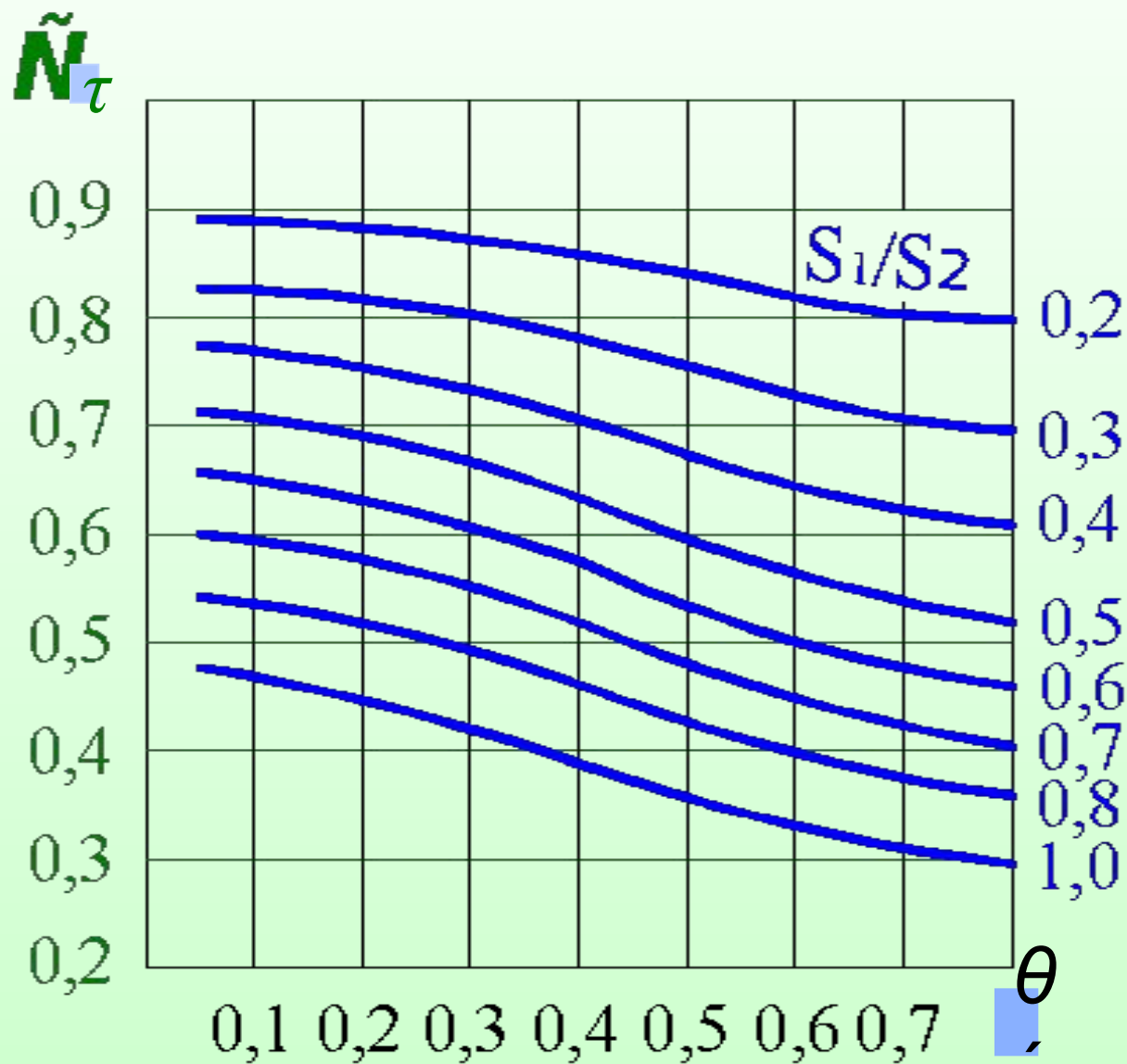
Діаграма розрахункових коефіцієнтів вологопровідності деревини поперек волокон:



Діаграма коефіцієнту вологообміну α



Діаграма коефіцієнту C_T



Товщина висушуваних сортиментів коливається у широких межах (шпон – бруски) і критерій Vi може приймати як дуже малі, так і дуже великі числові значення.

Для сортиментів **товщиною більше за 20-25** мм $Vi \rightarrow \infty$ і рівняння тривалості сушіння можна спростити до:

$$\tau = \frac{S^2}{\pi^2 a'} \ln \left(0,81 \frac{1}{\theta} \right)$$

Низькотемпературний процес.
Початкова вологість $W_n > W_{mn}$

Просте застосування вищенаведеного рівняння є некоректним. Спроби вирішити цю задачу з одночасним урахуванням капілярного підсмоктування вільної вологи до поверхні сортименту поки не дали позитивних практичних результатів.

Досвід показав, що використання цього рівняння у випадку $W_n > W_{mn}$ дає не дуже велику (15-20%) для наближених практичних розрахунків похибку.

Задачі:

1.Визначити середній коефіцієнт вологопровідності деревини дуба (поперек волокон) при температурі $t=60^\circ\text{C}$.

2.Визначити середнє значення коефіцієнт вологообміну між деревиною і середовищем за умов: температура середовища $t=90^\circ\text{C}$, ступінь насиченості $\varphi=0,6$ і швидкість циркуляції $\omega=2,0$ м/с.

3.Визначити тривалість сушіння березових дощечок перетином 10x50 мм від початкової вологості 28% до кінцевої 9% у повітрі, що рухається із швидкістю 2 м/с при $t=80^\circ\text{C}$ і $\varphi=0,55$.

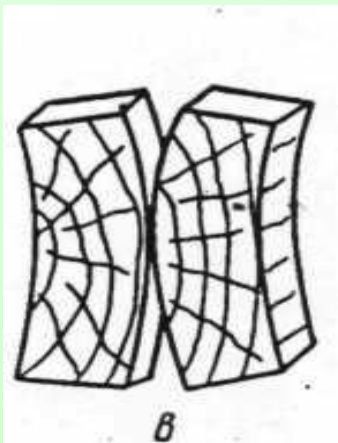
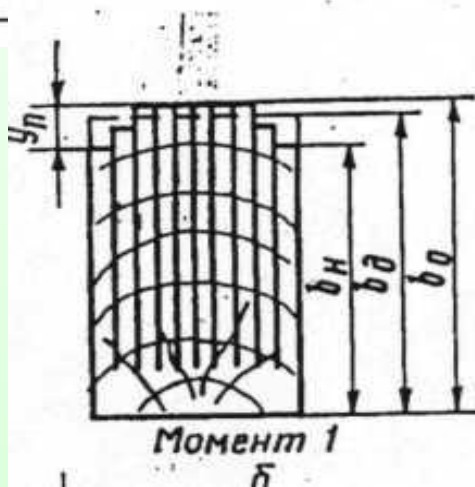
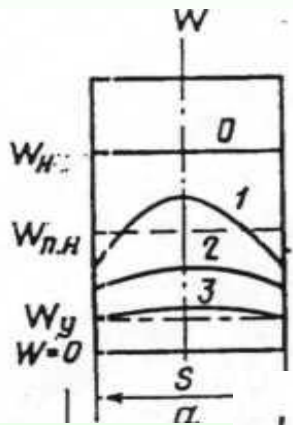
4.Визначити тривалість сушіння соснових дощок перетином 3x10 см від початкової вологості 75% до кінцевої 15% у повітрі з $t=70^\circ\text{C}$ і $\varphi=0,6$.

Внутрішні напруження в деревині при її сушінні, закономірності їх утворення та розвитку

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

На початку процесу ще немає усушки і напруження відсутні (**момент 0**).

Через деякий час вологість поверхневих шарів стане нижчою за W_{MH} (**момент 1**) і вони будуть прагнути усохнути. Але це не може реалізуватися у повній мірі внаслідок протидії внутрішніх шарів.

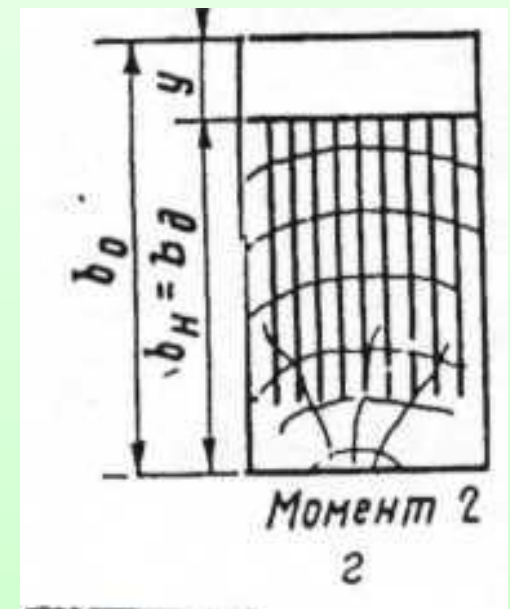
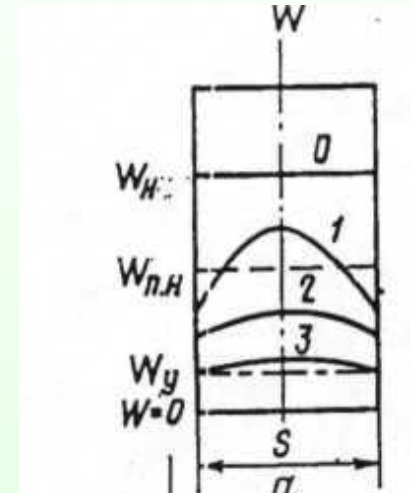


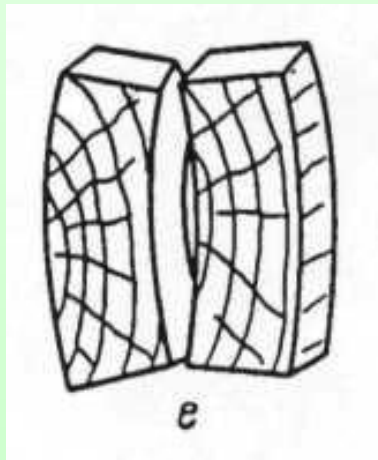
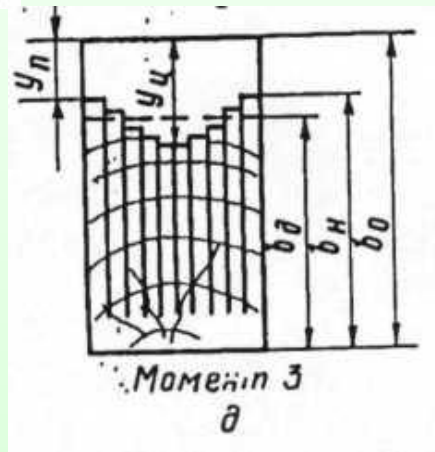
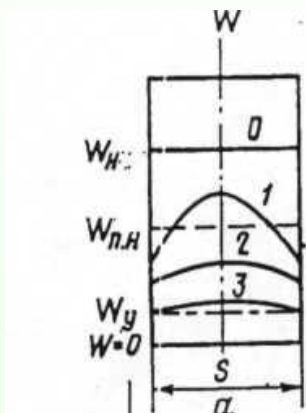
Поверхні шари – набули **усушки** $U_{\text{п}}$ і у вільному стані прийняли свій номінальний розмір, що відповідає фактичній вологості, b_H . Цілий нерозрізаний зразок має ширину b_0 , меншу ніж b_0 , але більшу за b_H .

В цей момент **реальний розмір поверхневих шарів** більше їх номінального розміру, тобто вони **відчувають розтягуючі напруження**; а **внутрішні шари**, реальний розмір яких менше номінального – **стискаючі напруження**. Щоб виявити ці напруження, слід **порушити рівновагу** шляхом розкрою зразка на частинки, які прагнутимуть до нового врівноваженого стану за рахунок власної деформації.

Якщо деревина була б ідеально пружним тілом, внутрішні напруження, що з'явилися в ній протягом першої стадії процесу, при зменшенні перепаду вологості також зменшувалися б і поступово щезли при остаточному вирівнюванні вологості. Дійсно, на деякому проміжному етапі (**момент 2**) напруження в деревині щезають, а потім в кінці процесу зростають, змінивши свій знак. Причина цього – розвиток залишкових деформацій.

Залишкові деформації виникають в деревині що довгий час знаходилася під напруженням, навіть при стабільному вологісному стані. До того ж при висиханні **пружні деформації** в ній перероджуються в залишкові у зв'язку з тим, що **при зниженні вологості суттєво збільшується модуль її пружності**.





На **початковій** стадії процесу, коли волога нагріта деревина має збільшену податливість, в **поверхневих** шарах під дією **розтягуючих напружень** виникають **залишкові деформації подовження**, а у **внутрішніх**, навпаки, **залишкові деформації скорочення**. В результаті **наприкінці процесу** (**момент 3**) усадка на поверхні U_p буде **меншою** за усадку в центрі U_c . Номінальний розмір **поверхневих шарів** буде більше номінального розміру внутрішніх шарів, і в деревині з'являться **стискаючі напруження** на поверхні і **розтягуючі всередині**. Секція розрізана на дві частини, буде деформуватися інакше.

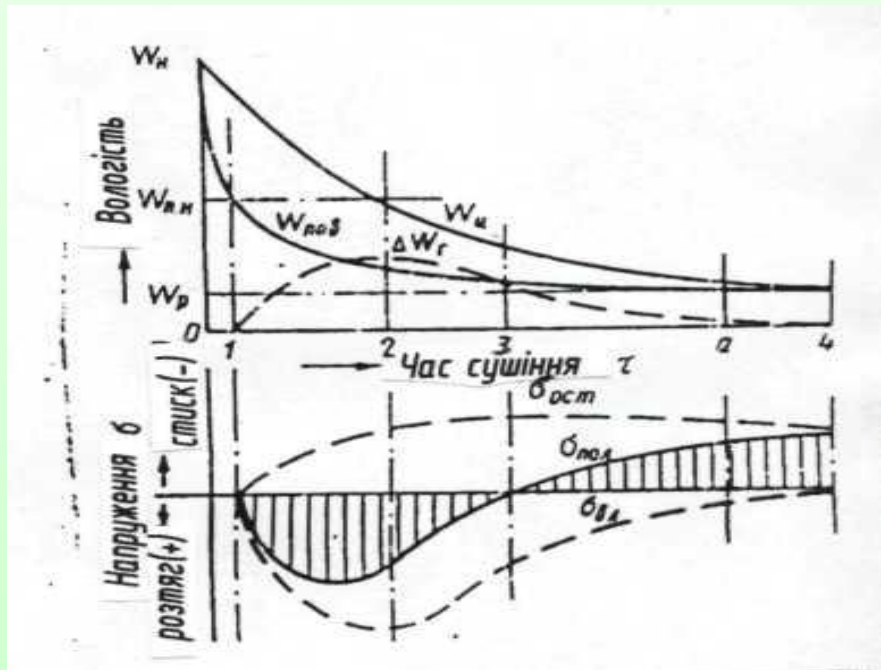
Якщо **внутрішні напруження** у будь-якій точці сортименту досягнуть **границі міцності**, відбудеться **руйнування** матеріалу – розриви тканин в зоні дії розтягуючих напружень (в **першій стадії** – на **поверхні**, в **другій стадії** – **всередині** матеріалу).

Зовсім запобігти в деревині внутрішніх напружень при конвекційному сушінні неможливо, але при дотриманні правильного режиму їх величину можна суттєво знизити і попередити руйнування матеріалу. Крім того, внутрішні напруження можуть бути не тільки зменшені, а й ліквідовані **вологотеплообробкою** деревини в кінці процесу.

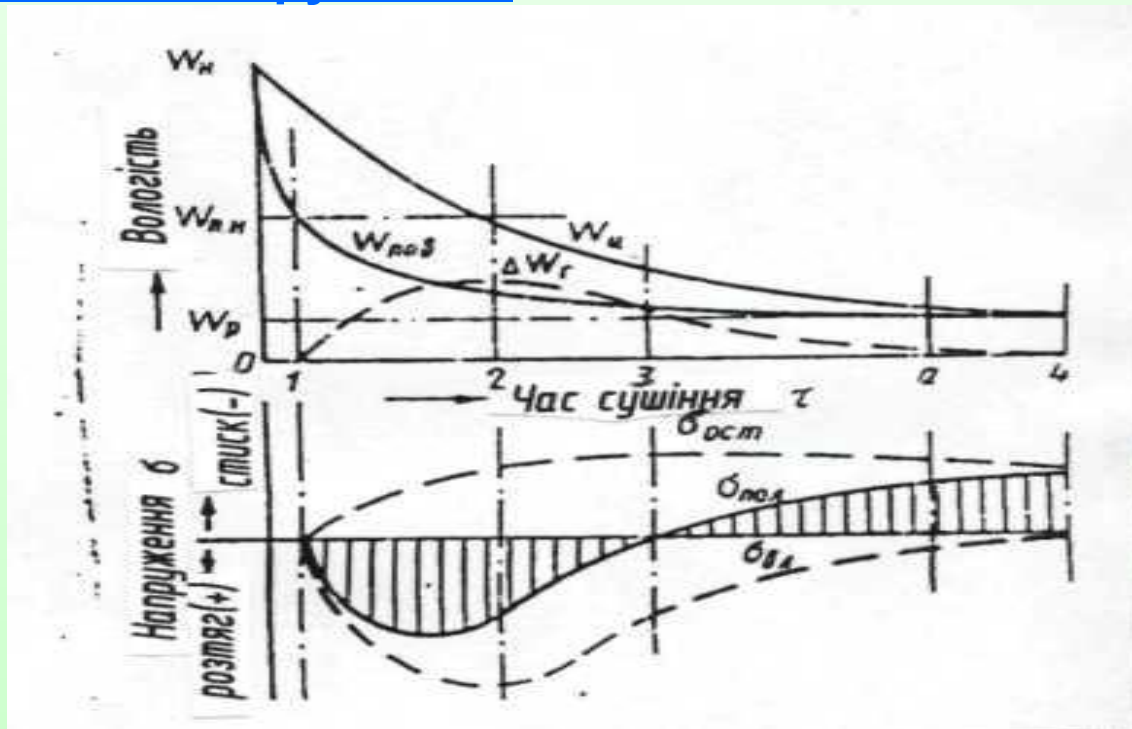
Зволоження поверхневих шарів за наявності стискаючих напружень веде до **розвитку** в них **залишкових деформацій скорочення**, що компенсують раніше виниклі залишкові деформації подовження.

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. **Вологісні** напруження характерні для абсолютно пружного тіла і обумовлені нерівномірною за об'ємом усушкою деревини. Вони мають **тимчасовий характер** і щезають при вирівнюванні вологості. **Залишкові** напруження обумовлені наявністю в деревини **неоднорідних залишкових** деформацій.

На початку процесу (**момент 0-1**) вологість деревини ще більша за W_{MH} і усушки немає. Коли **вологість поверхневих** шарів стає нижчою за W_{MH} , виникають **розтягуючі вологісні** напруження (**момент 1-2**). Вони **викликають залишкові деформації подовження**, які приводять до **виникнення стискаючих залишкових напружень**. Підсумкові повні напруження мають знак більшої складової (+). Під дією **розтягуючих повних** напружень **залишкові подовження** поступово **збільшуються** і відповідно **збільшуються залишкові напруження**.

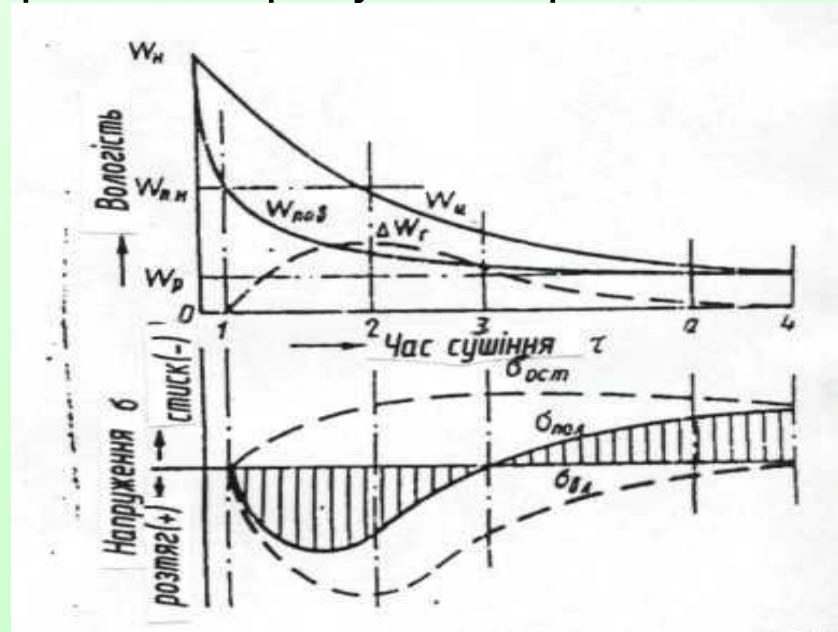


Після **зниження** вологості **центральных** зон до величини меншої за W_{MH} , перепад вологості зменшується і, відповідно, **зменшуються вологісні напруження**. **Повні напруження також зменшуються**, тому і збільшення залишкових напружень уповільнюється. В деякий час (**момент 3**) вологісні напруження стають рівними за величиною залишковим, а повні – зникають. Цим закінчується перший етап розвитку напружень, коли на поверхні матеріалу діють повні розтягуючі, 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 є не дуже суттєвим, оскільки 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** напруження. Як правило процес сушіння закінчується раніше, коли в матеріалі ще присутній перепад вологості.



Контроль внутрішніх напружень в деревині

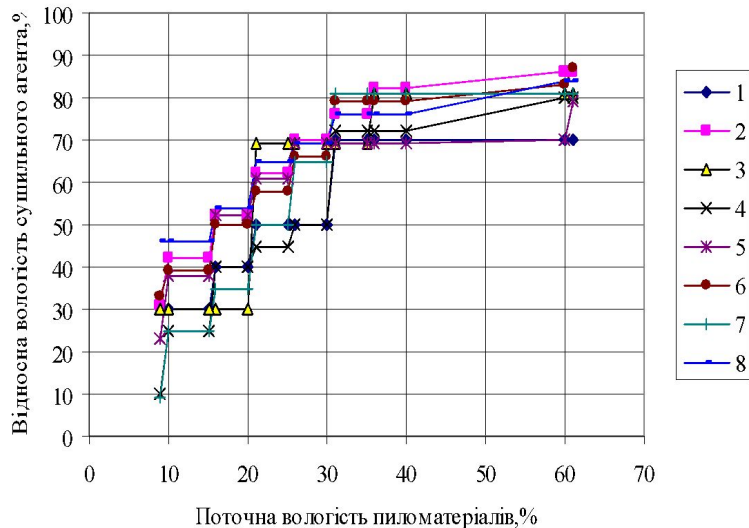
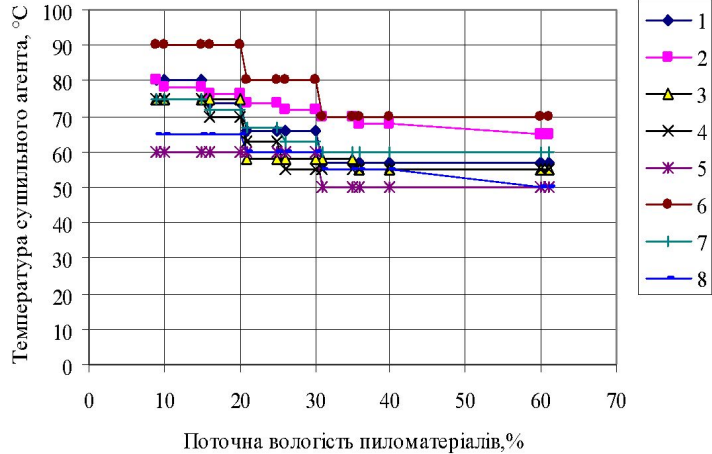
Якісну оцінку для виробничих цілей можна побачити по вигину пластинок розколотих секцій або по деформаціях силових секцій (розглядається в розділі по технології сушіння).



Проблема **кількісного** контролю внутрішніх напружень значно складніша. Б.Н.Уголевим розроблено метод (ГОСТ 11603-73) кількісної оцінки залишкових напружень, який оснований на вимірюванні пружних деформацій окремих елементів зразка (після його розкрою на тонкі шари) і безпосередньому визначенні модуля пружності цих елементів. Цей метод з деякими доповненнями (охолодження секцій) може бути використано і для вимірювання повних внутрішніх напружень при атмосферному та низько-температурному сушінні.



Вимоги до режимів сушіння



Режимом сушіння називається розклад стану сушильного агента 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**. На **початку** процесу для цього необхідно забезпечити малу величину перепаду вологості ($W_{MN} - W_{пов}$), для чого застосовують режими з **високою ступеню насиченості ϕ** сушильного агента. По мірі висихання деревини величину ϕ **необхідно знижувати**, щоб досягти необхідної кінцевої вологості деревини. **Температуру** середовища **доцільно підвищити** в кінці процесу – це інтенсифікує процес і не сприятиме зниженню міцності деревини, тому що остання матиме вже понижену вологість.

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

Критерій жорсткості характеризує інтенсивність випаровування вологи в сушильний агент. **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 зі зниженням вологості деревини.

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

Критерій безпеки визначає наскільки даний режим запобігає руйнуванню деревини під дією внутрішніх напружень. Його величина оцінюється відношенням границі міцності деревини до максимальних напружень в ній:

$$B = \sigma_{пр} / \sigma_{макс.}$$

Якщо критерій **$B > 1$** - режим є безпечним; коли **$B \leq 1$** – деревина буде розтріскуватися.

Критерій **B** може бути розрахований: знайдені розрахунковим методом напруження співставляють з границею міцності на розтяг деревини в той момент часу і в тій зоні дошки де вони є максимальними, а саме на **початку процесу – на поверхні, а в кінці процесу – в центрі.**

Для сушіння **шпона** та **подрібненої деревини**
застосовують інші режими.

Технологія подальшого використання цих матеріалів допускає розтріскування. Тому режими в цьому випадку повинні забезпечувати тільки **максимальну інтенсифікацію процесу** при збереженні хімічних властивостей та мікроструктури деревини. Використовуються високотемпературні режими (200-300 °С) за принципом **зниження рівня температури протягом процесу**. На початку процесу при наявності в деревині вільної вологи температура матеріалу залишається на рівні 100 °С і ніяких хімічних змін не відбувається. По мірі зниження вологості температура деревини наближується до температури середовища і, для запобігання хімічних змін і запалювання матеріалу, температуру сушіння знижують.