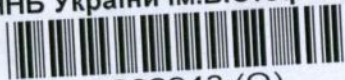




ЛННБ України ім.В.Стефаника



00802943 (Q)

Український Державний  
лісотехнічний університет

на правах рукопису

БОРИСЕНКО  
Теодор Ілліч

**СУШІННЯ ПОДРІБНЕНИХ ВІДХОДІВ ДЕРЕВИНИ  
В УСТАНОВКАХ ЩІЛЬНОГО ШАРУ**

*Спеціальність:* 05.21.05 - Технологія і устаткування  
деревособробного виробництва,  
деревинознавство

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук в  
формі наукової доповіді

Львів - 1993 рік

АВ 28801

Робота виконана на кафедрі технології деревообробки Українського Державного лісотехнічного університету

Наукові керівники: академік АН технологічної кібернетики України, доктор технічних наук, професор Гірник М.Л.  
член кореспондент академік АН технологічної кібернетики України, кандидат технічних наук, доцент Гербеї В.М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Калиновська О.П.  
кандидат технічних наук Книш Ю.В.

Провідна установа: Проектно-конструкторський технологічний інститут (ПКТІ), м. Ів.Франківськ

Захист відбудеться "21" грудня 1993р.  
в "14<sup>00</sup>" годині на засіданні спеціалізованої вченої ради КО88.29.02 в Українському Державному лісотехнічному університеті за адресою: 290057, м. Львів, вул. Пушкіна 103, зал засідань.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Українського Державного лісотехнічного університету.

Автореферат розісланий "15" листопада 1993р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Носовський Т.А.

Актуальність теми. На підприємствах лісопромислового комплексу України щорічно утворюється до 40% відходів деревини від загального об'єму її переробки, з яких тільки третя частина використовується як вторинна сировина. Вузким місцем у вирішенні питання більш повного технологічного використання деревинних відходів є їх сушіння. Проблема раціонального сушіння подрібнених відходів деревини, на вирішення якої спрямовані дані дослідження, в сучасних умовах дефіциту сировинних ресурсів набула особливої актуальності.

Для сушіння подрібненої деревини на сьогодні використовуються установки різних типів і конструкцій, серед яких найбільш поширені установки, в яких сушіння реалізується в рухомих шарі з використанням конвективного підводу тепла. Це перш за все барабанні та пневмосушарки, установки колонного типу, в яких використані різноманітні технологічні схеми взаємодії агента обробки і висушуваного рухомого матеріалу.

Визначення раціональних теплових схем і апаратного оформлення сушильних установок пов'язане з певними труднощами обумовленими в першу чергу обмеженістю експериментальних даних з питань дослідження технологічних властивостей подрібнених відходів деревини як об'єкту сушіння і відсутністю єдиного підходу до моделювання та розрахунку тепло- і масообмінних процесів обегроднення даного класу матеріалів. Вирішення вказаної проблеми дозволить суттєво знизити енергоємність процесів сушіння і доповнити на 25-30% ресурсний об'єм деревини.

Мета і задачі дослідження. Обґрунтування раціональних режимів сушіння подрібнених відходів деревини в установках шільного шару та розробка інженерних методів їх розрахунку.

У відповідності до поставленої мети вирішувались наступні задачі: - дослідження технологічних властивостей подрібнених відходів деревини як об'єкту сушіння; - розробка методичних основ формалізації тепло- і масообмінних процесів

сушіння полідисперсних фракцій деревинних відходів в щільному шарі; - дослідження кінетики сушіння тонкого і товстих шарів; - дослідження аеродинаміки процесу сушіння; - обґрунтування конструктивних параметрів сушильної установки; - розробка системи розподіленого контролю режимних параметрів.

Наукова новизна роботи. Вивчені в елементарному шарі технологічні властивості подрібнених відходів деревини як об'єкту сушіння, досліджена кінетика і аеродинаміка процесу, синтезована математична модель динаміки тепломасосбінних процесів, розроблені раціональні алгоритми покрокового розрахунку процесу обезводнення щільних шарів подрібненої деревини, науково обґрунтовані параметри сушильної установки.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використані методи математичного моделювання, теорії теплофізики, перетворення Фур'є і Лапласу. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана з використанням методів математичної статистики.

Практична цінність. На основі проведених досліджень розроблені раціональні режими сушіння полідисперсних фракцій відходів деревини в установках щільного шару, виявлені основні закономірності топології параметричних температурно-вологісних полів сушильного матеріалу, обґрунтовані конструктивні параметри сушарки, розроблені алгоритми покрокового розрахунку обезводнення матеріалу в щільних шарах.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на:

- Міжнародній конференції з питань сушильної справи (м.Карлові Вари, ЧСФР, 1991р.)
- Всесоюзній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми деревогосподарства" (м.Красноярськ, 1987р.)
- Науково-технічних конференціях Львівського лісотехнічного інституту ім.П.С.Погребняка (м.Львів, 1992-93рр.).

Основні положення, які вносяться на захист:

- дослідження в елементарному шарі технологічних властивостей подрібнених відходів деревини як об'єкту сушіння; - розробка методичних основ формалізації тепло- і масообмінних процесів в щільному шарі; - обґрунтування раціональних режимів сушіння; - обґрунтування конструктивних параметрів та розробка сушарки з вертикальним промишуванням щільного шару.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 34 наукові статті та 5 монографій.

Структура та об'єм роботи. Дисертація представлена у вигляді наукової доповіді, в якій узагальнені результати проведених наукових досліджень і опублікованих автором праць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

### Вступ

В умовах наростання дефіциту сировинних ресурсів максимальна утилізація відходів деревообробки є першочерговою задачею.

Створення безвідходного виробництва деревообробки - це комплексне завдання, яке вимагає проведення ряду організаційно-технічних заходів, розробки нових технологічних процесів, обладнання, що дозволяло б забезпечити максимальне і комплексне використання деревини, звести до мінімуму негативну дію відходів на оточуюче середовище. До відходів деревообробки відносяться обрізки пиломатеріалів і заготовок, шпон-рванина, тирса, стружка і т.п. На сьогодні утилізація відходів реалізується по двох основних напрямках: перший - їх переробка на базі нових технологій у вторинні матеріальні ресурси і другий - використання відходів як джерела тепла та енергії. Аналіз результатів наукових досліджень проведених в Україні та світовий досвід показує, що практично всі види відходів деревообробки можуть бути використані в якості вторинних сировинних ресурсів для отримання різноманітної продукції. Реальність і технічна доцільність використання відходів доведена практикою роботи багатьох підприємств лісоп-

промислового комплексу.

Однак, вирішення вказаної проблеми стримується в даний час відсутністю єдиного підходу в методах і принципах реалізації безвідходних технологій, недосконалістю обладнання та недостатньою кількістю обґрунтованих рекомендацій по їх створенню.

Одним з вузьких місць, що отримує впровадження безвідходних технологій є сушіння подрібненої деревини. Існуюче сушильне обладнання, яке використовується в даний час енерго і металомне, режими сушіння не завжди достатньо науково обґрунтовані. Розробка універсального методу розрахунку процесів тепломасопереносу в щільному шарі дозволить виробити єдиний підхід в створенні енергозберігаючих режимів сушіння, обґрунтуванні конструктивних параметрів вискоефективних сушарок.

На сьогодні в деревоспиритній промисловості для сушіння подрібненої деревини в основному використовуються сушарки безперервної дії (прохідного типу), в яких висушуваний матеріал і агент обробки безперервно рухаються.

Це барабанні, пневмосушарки, установки колонного типу, в яких реалізований принцип сушіння пов'язаний з переміщенням сушеного матеріалу. Розрахунки процесів тепломасопереносу в сушарках проводяться в більшості випадків при допомозі напівемпіричних залежностей, які не завжди відображають внутрішній механізм протікання явищ. В минулому такий підхід задовільняв вимогам наближеного розрахунку сушарок і продовжує відігравати позитивну роль. Разом з тим, впровадження безвідходних технологій, створення низькоенерго- і матеріалозного обладнання, інтенсифікація процесів сушіння ставить перед науковцями і спеціалістами більш складні задачі (оптимізація, автоматичне проектування, керування). На сьогодні для опису процесів сушіння і їх системного дослідження все ширше використовується феноменологічна теорія тепломасопереносу і математичні моделі, які базуються на диференціальних рівняннях в частинних похідних.

Головною метою, яка ставиться до синтезуючих математичних моделей - це відображення тих сторін поведінки процесу, значення яких необхідно для подальшого аналізу та розробки

раціональних режимів сушіння. Для обґрунтування енергозберігаючих режимів та розробки на їх основі раціональної конструкторської сушарки необхідне комплексне дослідження технологічних властивостей подрібнених відходів деревини як об'єкту сушіння, створення ґрунтовної інженерної бази для розрахунку кінетики та динаміки їх обезводнення в щільному шарі.

СУЧАСНИЙ СТАН В ОБЛАСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛО І МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ

Конвективне сушіння подрібнених відходів деревини в щільному шарі - типовий нестационарний процес, який характеризується одночасним проявом тепло- і вологопереносу. На сьогодні аналітична теорія тепло- і масопереносу дозволяє при певних граничних умовах визначити закономірності розподілу температурних вологісних полів лише для тіл правильної геометричної форми (пластинка, кулька, циліндр і інші). Поряд з цим, ряд дослідників розвиваючи загальну теорію тепло- і масообміну пропонують використати для розрахунку температурно-вологісних полів тіл неправильної форми модифіковані підходи, які включають в себе поняття "Інтегральні характеристики" форм, які однак не завжди призводять до коректних результатів і не забезпечують бажану точність розрахунку процесу сушіння. Що стосується дослідження тепло- і масообміну в шарі, де процес протікає при змінному режимі, то аналітичний розв'язок системи диференціальних рівнянь процесу не отримує достатнього вирішення. Причина цьому - нелінійність вихідної системи рівнянь, які описують динаміку протікання тепло-масообмінного процесу.

Дослідження процесів сушіння із внутрішнім вологопереносом подрібненого матеріалу промодельовано у виді кульки, виконано В.І.Видко. Нехтуючи градієнтом в середині матеріалу ним отримано розв'язок рівняння внутрішнього вологопереносу.

$$\frac{\partial W}{\partial t} - \nu_{eff} \left[ \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + 2 \frac{\partial W}{\partial r} \right] \quad (1)$$

при умовах:

$$\begin{aligned} W(r, 0) - W_D &= W(r, \infty) - W_D & (2) \\ t(r, 0) &= W_D - \text{const} \end{aligned}$$

В результаті спрощень одержано приближений вираз для визначення середньої вологості тонкого шару матеріалу:

$$W_{\text{ср}} = W_D + (W_D - W_D) \cdot e^{-\frac{F}{G_{\text{сух}}} \tau} \quad (3)$$

де  $F_{\text{нас}}$  - тиск насиченої пари;

$\frac{F}{G_{\text{сух}}}$  - питома поверхня випаровування;

Коефіцієнти, а також залежність температури нагрівання матеріалу від основних параметрів процесу сушіння визначались експериментально. На основі сумісного аналітичного і експериментального дослідження тепло і масообмінних процесів, запропоновано ітераційний кроковий метод визначення оптимального сушіння.

В.М. Івченко-Савицьким проведено дослідження процесу сушіння тонкого шару матеріалу в умовах зовнішнього тепло- і масообміну. При цьому прийнято ряд припущень, зокрема, що коефіцієнти випаровування залежить лише від величини вологості і режим сушіння є стаціонарним.

Визначний об'єм досліджень виконано Мільманом Й.Е. по визченню нестационарного режиму сушіння в тонкому шарі. Використовуючи функціональне перетворення Лапласа, отримано зображення в комплексній площині функцій температури і вологості матеріалу, які після апроксимації дробово-раціональними функціями були використані для опису динамічних характеристик сушального апарату.

Найбільш точний аналітичний розв'язок задачі тепломасообміну в тонкому шарі висушуваного матеріалу наведено в матеріалах Б.Клапа. Припускаючи, що в пограничному шарі між вологістю і температурою матеріалу існує лінійний зв'язок, ним отримано розв'язок висхідної системи лінійних диференціальних рівнянь, які описують динаміку протікання тепло- і масообмінних процесів сушіння.

В точці зору поставленої нами задачі розв'язок Клапа не вичерпним, оскільки при цьому розглянуто лише стаціонарний режим процесу тепло- і масопереносу, при якому вологість і температура приймають постійними, а змінювались лише по просторових параметрах.

Значний інтерес становлять праці В.Беккер-Арнема, присвячені моделюванню стаціонарних задач процесу тепло-масообміну в пограничному шарі. При цьому розроблена методика розв'язку висхідної системи диференціальних рівнянь числовим методом.

Ряд методологічних підходів моделювання тепло-масообмінних процесів сушіння тонкого шару вирішена в роботах Г.Д.Рабиновича і В.А.Шеймена. В них розглядається модель процесу, в якій, крім теплообміну в системі матеріал-теплоносії, діє відємне, рівномірно розподілене джерело, що фізично імітує випаровування вологи. При цьому формалізована модель представлена системою диференціальних рівнянь процесу з врахуванням внутрішнього джерела тепла інтенсивності  $q$ :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} - (2, \eta) - f_1(2, \eta) - \tau(2, \eta) - \theta(2, \eta) \quad (4)$$

$$\frac{\partial t}{\partial z} - (2, \eta) - \theta(2, \eta) - t(2, \eta), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\alpha F}{\beta_1} \theta, \quad \eta = \frac{\alpha F}{\beta_2} \tau, \quad f_1 = \frac{q\theta}{\alpha F}$$

Розв'язок системи (4) і (5) одержано з використанням методу Рімана і отримано розрахункове співвідношення для визначення температури матеріалу з умови відомої потужності відємного джерела тепла:

$$\theta(2, \eta) = \left( (h/\xi)^{1/2} I_1(2(h/\xi)^{1/2}) - \int_0^h f''(\xi, \varphi) d\varphi + \int_0^h [(h-\varphi)/\xi]^{1/2} I_1(2[(h-\varphi)/\xi]^{1/2}) [t'(0, \varphi) + t(0, \varphi)] e^{-\varphi} d\varphi \right)$$

$$\int_0^h \int_0^{\xi} f''(x, \varphi) \left[ \frac{(h-\varphi)}{(\xi-x)} \right]^{1/2} I_1 \left( 2 \left[ \frac{(\xi-x)}{(h-\varphi)} \right]^{1/2} \right) dx d\varphi e^{-\xi} \quad (8)$$

Однак труднощі визначення функції витрати тепла, яке йде на випаровування вологи, створюють певні перешкоди застосуванню такої моделі для сушіння полідисперсного матеріалу.

В роботах останніх років проявляється інтерес до моделювання тепломасообмінних процесів сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів, представлених в виді нелінійних систем з розподіленими і взаємопов'язаними параметрами, дослідження яких вдається провести з використанням найсучасніших електроннообчислювальних машин. При цьому використовуються наближені методи розрахунку тепло- і масообмінних процесів, що ґрунтуються на апроксимації складних трансцендентних функцій виразами більш простішого виду. До робіт цього напрямку в першу чергу слід віднести дослідження Гірника М.А., Мааяка З.Ю., Мільмана Й.Е., Степури О.І., Рибарука В.Я., Скородинського В.Д., в яких для оцінки допустимої похибки апроксимації еквівалентних функцій використовуються методи, побудовані на аналізі ланцюгових дробів, функцій Лягера. Однак в ряді випадків отримані результати важко піддаються опітові перевірці і узагальненню, що значно утруднює їх практичне використання. На сучасному етапі дослідження тепло- і масообмінних процесів кривективного сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів досить глибоко опрацьовані і широко освітлені в роботах Лимова А.В., Лур'є М.Ю., Каліновської О.П., Книша В.А., Мааяка З.Ю., Білея П.В., Лебедева Н.Д., Шубіна Р.С., Маника Я.М. та ін. При цьому розроблені коректні математичні моделі, які з достатньою для вирішення інженерних розрахунків точністю, описують процес обезводнення даного класу матеріалів. Слід зазначити, що процеси кривективного сушіння реалізуються в основному в умовах "помірних" гідродинамічних обставин, і при розробці їх математичного опису найбільшого поширення отримали методи з використанням рівнянь матеріального і енергетичного балансу, що дає можливість проводити оцінку отриманих результатів за допомогою непрямих інтегральних характеристик.

Значний об'єм досліджень з питань математичного моделювання процесів подрібненої деревини припадає на роботи Гнатишина Я.М., Куцакової, Стерлінга Д.М., в яких розглянуті задачі моделювання тепло- і масообміну в ріаного типу сушильних установках.

Проведений аналіз показує, що на сьогодні при вирішенні задач моделювання процесів тепло- і масообміну сушіння деревинних матеріалів використовуються різні підходи, при цьому найбільшого поширення при опці динамічних властивостей отримали методи в використанні детерміністичних підходів, що дає можливість проводити кількісну і якісну оцінку процесу сушіння та прогнозувати подальший перебіг його протікання.

При малих параметрах аналіз отриманих систем здійснюється за допомогою методів статистичних ансамблів Гіббса і нерівноважної термодинаміки, при цьому параметри моделей виражаються на підставі даних при розв'язуванні обернених задач.

Використання коротких моделей обумовлює врахування двоїстості природи досліджуваних тепло- і масообмінних процесів. При цьому найбільш глибоко теорію конвективного сушіння з оцінкою динаміки відпрацьовано тільки для випадків нерухомих фаз. Математичний опис процесів конвективного сушіння в шільному шарі не розроблений в достатній мірі, що значно стримує розробки нових технологій сушіння і впровадженню їх в виробництво. Вирішення цих задач дозволить в значній мірі скоротити час експериментального дослідження процесів сушіння, розробки інженерних методів їх розрахунку.

### 1. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ПОДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ В ШІЛЬНОМУ ШАРІ

Конвективне сушіння подрібненої деревини в шільному шарі є складним процесом переносу тепла і маси, який протікає в періодах поступової і надалі швидкої сушіння. В загальному виді процес сушіння описується складною системою диференціальних рівнянь. Для її спрощення використаємо наступні припущення: волога в матеріалі знаходиться в рідкому стані, тепломасообмін відбувається конвек-

тивно тільки між агентом обробки і висушуваним матеріалом, температурний градієнт по товщині частинки матеріалу незначний, яким можна нехтувати.

З врахуванням сказаного система рівнянь опису тепломасообміну в щільному шарі прийме наступний вид:

$$\frac{\partial t}{\partial t} + 3600 \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\rho_M C_M}{\rho_2 C_2 \varepsilon} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\rho_M \gamma}{\rho_2 C_2 \varepsilon} \frac{\partial W}{\partial t} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} - \frac{\rho_2 \varepsilon}{10 \rho_M} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + 3600 V \frac{\partial d}{\partial x} \right) = \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial t} + 3600 V \frac{\partial t}{\partial x} - \frac{\alpha_1 \rho_M}{\rho_2 C_2 \varepsilon} (t - \theta) = \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = K(W - W_p) \quad (4)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = N \quad (5)$$

де  $t$  - температура агента обробки;

$d$  - вологовміст агента обробки (на суху його масу);

$W$  - вологість подрібненої деревини;

$\theta$  - температура подрібненої деревини;

$V$  - швидкість циркуляції агента обробки;

$C_M, C_2$  - теплоємності відповідно подрібненої деревини і агента обробки;

$\varepsilon$  - коефіцієнт щільності шару;

$\gamma$  - прихована теплота пароутворення води;

$\alpha_1$  - коефіцієнт теплообміну;

$\rho_M$  - густина матеріалу;

$\rho_2$  - густина агента обробки;

$k$  - коефіцієнт сушіння;

$W_p$  - рівноважна вологість матеріалу;  
 $\tau$  - час сушіння;  
 $N$  - швидкість сушіння.

Перше рівняння відображає закон збереження енергії в процесі сушіння: тепло підведене підігрітим повітрям (ліва частина рівняння) використовується на нагрів матеріалу і випаровування води; друге - закон збереження речовини; останні два - закон масообміну; відповідно, четверте - в періоді падаючої швидкості сушіння і п'яте - в періоді постійної швидкості сушіння.

Стосовно до поставлених задач з широким діапазоном крайових і початкових умов, навіть з врахуванням прийнятих припущень, аналітичний розв'язок системи диференціальних рівнянь з частинним похідним пов'язаний з певними математичними труднощами. Тому при виборі методичного підходу до рішення прикладних інженерних задач віддають перевагу числовим методам аналізу, зокрема методу сіток, що базується на використанні кінцевих рівнянь відповідних параметрів.

При цьому локальні і частинні похідні замінювались на значення кінцевих рівнянь цих величин, в результаті чого система диференціальних рівнянь (1-5) перетворюється в систему алгебраїчних:

$$\Delta t = - \frac{C_M \rho_M \delta}{3600 V \rho_2 C_2} \Delta \theta - \frac{\rho_M \delta}{3600 \rho_2 V C_2} \gamma \Delta W \quad (6)$$

$$\Delta d = \frac{\rho_M \delta}{3600 V C_2} \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (7)$$

$$\Delta t = - \alpha_1 \frac{\rho_M \delta}{3600 V \rho_2 C_2} (\theta - t) \quad (8)$$

$$\Delta W = - K(W - W_p) \Delta t \quad (9)$$

$\Delta W = - N \Delta t$ 

(10)

де  $\delta$  - товщина тонкого шару, м.

Для забезпечення математичного моделювання процесу сушіння щільний шар матеріалу, представлений схематично на рис.1.1., розбивається на  $n$  розрахункових тонких шарів. Їх нумерація і починається з шару, в який поступає свіжий агент обробки  $i-1$ . Тривалість процесу  $\tau-L \Delta t$  складається з суми дискретних  $j-1 \dots L$  інтервалів часу тривалістю  $\Delta t$ . Розрахунок процесу сушіння проводять для кожної комірки матриці  $i-j$  - послідовно для кожного  $i-1 \dots n$  такого шару у відповідні інтервали часу  $j-1 \dots L$ . При цьому визначають значення параметрів матеріалу  $W_{ij}$ ,  $\theta_{ij}$  і агенту обробки  $t_{ij}$ ,  $d_{ij}$ , тобто всі необхідні параметри для інженерних розрахунків кінетики і динаміки процесу сушіння в щільному шарі.

Таким чином, алгоритм розрахунку процесу сушіння подрібненої деревини в щільному шарі багатується на послідовному в просторі і часі розрахунку тонкого шару матеріалу.

## 2. РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТОНКОГО ШАРУ ПОДРІБНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ

Точність розрахунку процесів сушіння в щільному шарі залежить перш за все від достовірності розрахунків тонкого шару подрібненої деревини. З метою спрощення розрахунків прийmemo, що рівноважна вологість деревини  $W_p$ , швидкість сушіння  $N$  або коефіцієнт сушіння  $K$  в  $i$ -му тонкому шарі в розглядуваній  $j$ -ій інтервал часу мають постійну величину і повинні розраховуватись за параметрами агента обробки на вході в шар. З рівнянь системи (6-10) найбільші труднощі для розрахунку викликає рівняння теплового балансу (8), оскільки невідомі параметри закономірностей теплообміну і значення температури матеріалу  $\theta$  і агента обробки  $t$  по висоті тонкого шару. Багатофакторна залежність для визначення коефіцієнту теплообміну і температурного напору суттєво збільшують об'єм і складність проводимих розрахунків. Експериментально підтверджено, що при сушінні подрібненої деревини середня температура  $\theta_{ij}$  в тонкому шарі близька до середньарифметичного

Принципова схема щільного шару подрібненої деревини

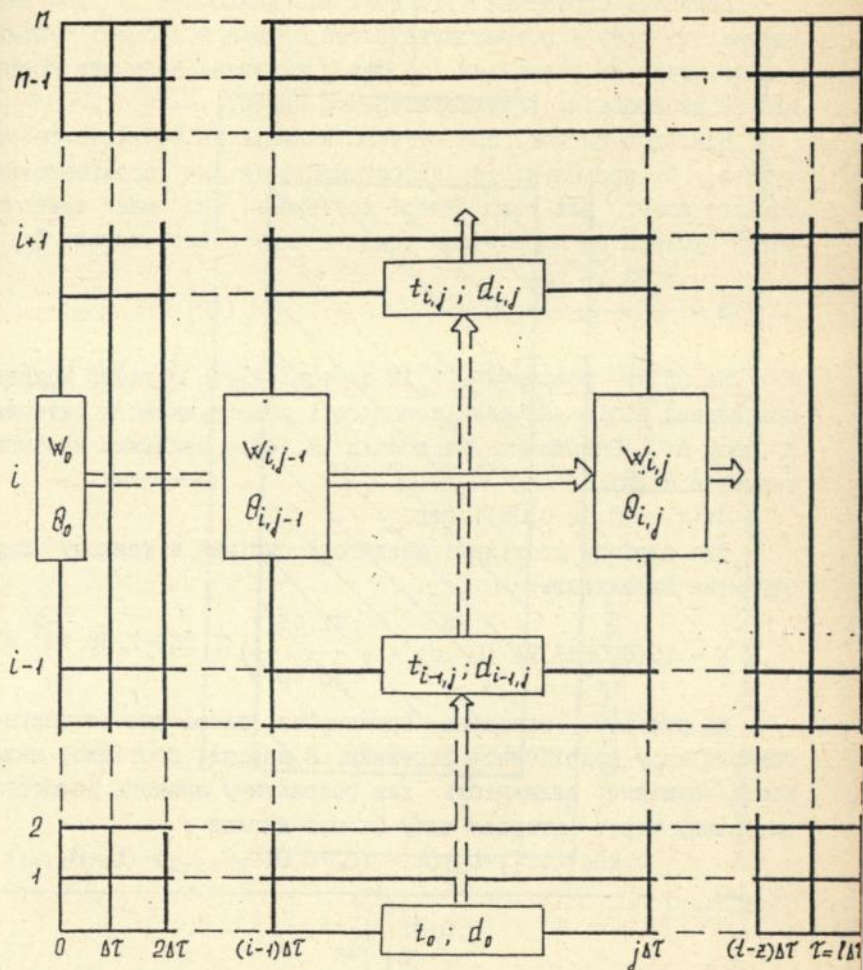


Рис.І.І. Принципова схема щільного шару подрібненої деревини

значення температури агенту обробки на вході  $t_{i-1j}$  і виході  $t_{ij}$  з нього, при чому в період постійної швидкості сушіння температура буде визначатися по температурі "мокрого" термометра  $t_M$

$$\theta_{ij} = 0,5(t_{i-1j} + t_{ij}) \quad (11)$$

Прийняте спрощення (11) дозволяє виключити з розгляду залежність (8) і розраховувати теплообмін в процесі сушіння тонкого шару за рівнянням (6) без врахування величини коефіцієнту теплообміну і температурного напору.

Важливою умовою, яка суттєво впливає на точність розрахунків, є правильність вибору критерія для характеристики тонкого шару. Для подрібненої деревини, яка має незначні зміни густини  $\rho_M$  параметром тонкого шару є його висота  $\delta$ :

$$\delta = \frac{3,63 \cdot 10^3 v \rho_2}{L \rho_M}, \text{ м} \quad (12)$$

На об'єм розрахунку і їх достовірність суттєво впливає правильний вибір значення тривалості розрахункового інтервалу часу  $\Delta t$ . Спираючись на досвід [8,14], приймемо наступні значення  $\Delta t(z)$ :

$$\Delta t(z) = (0,02-0,05), \text{ год.}$$

Для періоду постійної швидкості сушіння в тонкому шарі отримана залежність:

$$N = 10(6,05 + 8,24 \cdot 10^{-2} d) \left( t - \frac{72,05}{35,55 + d} \right) (1,255 - 2,56 \cdot 10^{-3} d) \quad (13)$$

На рис.1.2. наведена принципова схема для розрахунку тонкого шару подрібненої деревини. В періоді постійної швидкості сушіння залежність для розрахунку значень вологості матеріалу через інтервал часу  $\Delta t$  має вигляд

$$W_{ij} - W_{ij-1} = \frac{LC_2(t_{i-1j} - t_M)\Delta t + (C_M + 0,01C_W W_{ij-1})(t_M - \theta_{ij-1})}{0,01\Delta t} \quad (14)$$

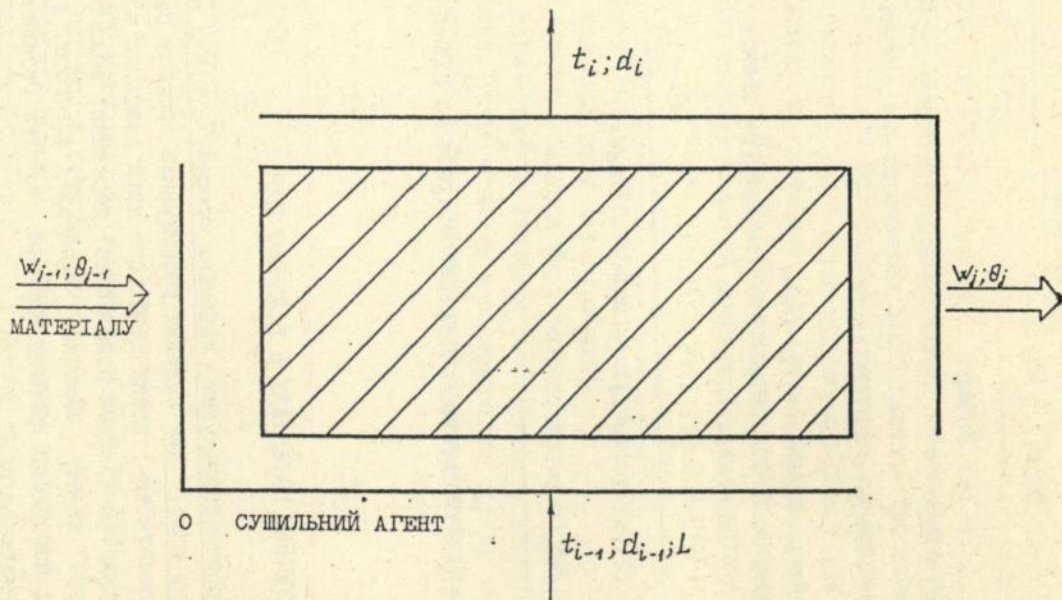


Рис. 1.2. Принципова схема розрахунку процесу сушіння в тонкому шарі

$$t_M = \frac{1795}{5,25 + \lg[1 + 522 / (0,402(t - t_M) + d)]} - 233 \quad (15)$$

Значення для розрахунку вологовмісту агенту обробки отримані з рівнянь матеріального балансу (?).

$$d_{ij} - d_{i-1j} + \frac{W_{ij} - W_{i-1j}}{0,1L\Delta t} \quad (16)$$

При аналітичному описі процесу сушіння в періоді падаючої швидкості розрахункові залежності для визначення  $W_{ij}$  і вологовмісту  $d_{ij}$ , відповідають

$$W_{ij} - W_{i-1j} = K(W_{i-1j} - W_p)\Delta t \quad (17)$$

$$d_{ij} - d_{i-1j} + K(W_{i-1j} - W_p) / 0,1L \quad (18)$$

Залежність для розрахунку температури агенту обробки на виході з шару запишеться

$$t = \frac{0,5(C_M + 0,01C_M W_{i-1j})\theta_{i-1j} + L\Delta t(C_B + 10^{-3}C_M d_{i-1j})t_{i-1j} - 0,01r(W_{i-1j} - W_{ij})}{0,5(C_M + 0,01C_M W_{ij}) + L\Delta t(C_B + 10^{-3}C_M d_{ij})} \quad (19)$$

Температура матеріалу розраховується по рівнянню (11).

### 3. СУШІННЯ МАТЕРІАЛУ В ЩІЛЬНОМУ ШАРІ

Алгоритм розрахунку динаміки процесу сушіння матеріалу в щільному шарі. Для ведення розрахунків процесу сушіння в якості початкових даних необхідно мати значення початкової вологості і температури подрібненої деревини, вологовмісту і температури агенту обробки, кінцевої вологості деревини, швидкості циркуляції агенту обробки, висоти (товщини) висушуваного матеріалу.

Алгоритм розрахунку процесу сушіння подрібненої дереви-

ни в щільному шарі зводиться до слідуєчих операцій:

1. Вибір розрахункового інтервалу часу

$$\Delta t = (0,2-0,5)10^{-2} \text{ год.}$$

2. Розрахунок кількості тонких шарів

$$n_p = \frac{\delta L \rho_s}{2,6 \cdot 10^{-3} v \rho_p} \quad (20)$$

3. Розрахунок процесу сушіння в першому  $i-1$  по ходу руху агенту обробки тонкому шарі для першого  $j-1$  розрахункового інтервалу  $0-\Delta t$ .

Вихідні дані для розрахунку - початкові параметри подрібненої деревини  $W_0$ ,  $\theta_0$  і агенту обробки  $d_0$ ,  $t_0$ .

Використовуючи залежності (14,15,16) розраховуються параметри  $W_{ij}$ ,  $t_{ij}$ ,  $d_{ij}$ ,  $\theta_{ij}$  для періоду постійної швидкості сушіння. Для періоду падаючої швидкості сушіння ( $W_{ij} < W_{кр}$ ) використовуючи рівняння (17, 18) визначають параметри  $W_{ij}$ ,  $t_{ij}$ ,  $d_{ij}$ ,  $\theta_{ij}$ .

4. Розрахунок процесу сушіння в слідуєчому ( $i$ -му) тонкому шарі по напрямку руху агенту обробки.

Розрахунок проводиться як і першого тонкого шару, але вихідними параметрами є значення температури і вологості агенту обробки, який входить з попереднього ( $i-1$ ) тонкого шару. Розрахунок  $n$ -го тонкого шару і розрахунок середньої вологості

$$W_j = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n W_{ij} \quad (21)$$

і температури

$$\theta_j = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n \theta_{ij} \quad (22)$$

щільного шару матеріалу закінчується перший ( $j-1$ ) цикл, який відповідає процесу в першому періоді  $0-\Delta t$ .

5. Розрахунок процесу сушіння в кожен наступний  $j$ -й інтервал тривалістю  $\Delta t$  ( $j=1,2,\dots,L$ ) ведуть аналогічно. При цьому вихідними параметрами є результати розрахунку  $i$ -го тонкого шару в попередньому тонкому шарі.

6. Тривалість сушіння цілого щільного шару подрібненої деревини визначають по досягненні заданого значення її середньої вологості. Залежність для визначення тривалості сушіння має вигляд

$$\tau - 1\Delta\tau \frac{n_p}{n} \frac{W_0 - W_M}{W_0 - W_1} \quad (23)$$

Разом з визначенням часу сушіння отримують розподіл температури і вологості матеріалу та агенту обробки по товщині щільного шару, а також питомий розхід тепла на випаровування води Q:

$$Q = \frac{4,19L\tau C_p(t_0 - t_2)}{n(W_0 - W_k)}, \text{ кДж/кг} \quad (24)$$

Розроблена методика розрахунку процесу сушіння щільного шару подрібненої деревини може бути використана для нерухомого щільного шару і для схеми з перехресним рухом матеріалу і агенту обробки.

Для реалізації вказаного алгоритму розроблені програми для розрахунку процесу сушіння з використанням ЕОМ.

Для одиничних розрахунків з метою спрощення, температуру агенту обробки в період падаючої швидкості сушіння на виході з тонкого шару можна визначити по наступній залежності

$$t_{ij} - (1-A)t_{i-1j} + Av_{ij} - Bk(W_{i,j-1} - W_p)\Delta\tau \quad (25)$$

$$A = \frac{C_M + 0,01C_M W_{i,j-1}}{LC_p\Delta\tau + 0,5(C_M + 0,01C_M W_{i,j-1})} \quad (26)$$

$$B = \frac{0,01r}{LC_p\Delta\tau + 0,5(C_M + 0,01C_M W_{i,j-1})} \quad (27)$$

При ручному розрахунку процесу сушіння доцільно, крім

того, користуватись номограмою для визначення коефіцієнта сушіння  $K$  і рівноважної вологості  $W_p$ .

#### 4. СУШІННЯ ПОДРІБНЕЇ ДЕРЕВИНИ В ЦІЛЬНОМУ ШАРІ ПРИ ІІ ПЕРЕМІШУВАННІ

Процес сушіння в ряді сушарок (баребанні, шахтові, багатходові конвеєрні) проходить з періодичним перемішуванням подрібненої деревини. Вказаний факт істотно впливає на інтенсивність та рівномірність просихання і потребує додаткового дослідження.

В сушарках з різними технологічними схемами кількість перемішувань  $m$  задається. Моменти перемішування визначаються виразом

$$J_{\xi} = \frac{r_{\xi}^2}{m} + j_{\xi} + 1 \quad (28)$$

де  $\xi$  - порядковий номер перемішування матеріалу ( $\xi=1, 2, \dots, m$ ).

Враховуючи, що значення  $j_{\xi}$  можуть бути тільки цілими числами, вираз з квадратних дужок заокруглюється до найближчого цілого числа.

Особливістю розглядуваного процесу є те, що в момент перемішування  $j_{\xi}$  параметри подрібненої деревини усереднюються і приймають значення

$$W_{j,\xi} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n W_{i,j,\xi} \quad (29)$$

$$\theta_{j,\xi} = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n \theta_{i,j,\xi} \quad (30)$$

Алгоритм розрахунку процесу сушіння подрібненої деревини з ІІ перемішуванням, полягає в наступному. Спочатку розраховують процес сушіння в цільному шарі без врахування перемішування і визначають попереднє значення тривалості сушіння  $\tau$ .

У відповідності із заданою кількістю перемішувань  $m$  по формулі (28) визначають моменти перемішувань  $j_1$  і для першого з них - параметри матеріалу  $W_{1j}$ ,  $\theta_{1j}$ . Потім, починаючи з моменту першого перемішування  $j_1\Delta t$  до другого  $j_2\Delta t$  повторно розраховують процес сушіння. Аналогічний розрахунок ведеться і після слідуючих перемішувань. Розрахунок процесу сушіння після останнього перемішування  $j_m$  закінчують при досягненні середньої вологості деревини  $W_0$  заданого значення  $W_K$ . Отримане значення  $t_2$  порівнюють з раніш отриманим. Розрахунок закінчують при розходженні двох послідовних значень не більше прийнятого  $\Delta t$ . На основі вказаного алгоритма розроблена програма і проведені з використанням ЕОМ розрахунки.

Виконані в широкому діапазоні зміни умов сушіння розрахунки процесу, дозволили оцінити вплив перемішування на його тривалість, нерівномірність сушіння, температуру нагріву матеріалу і питомий розхід тепла на випаровування води. Результати розрахунків представлені у таблицях 4.1., 4.2.

Перемішування матеріалу при його вологості до  $W < 50\%$  приводить до незначного (до 5%) збільшення тривалості сушіння  $t$  і питомого розходу тепла  $Q$ , а при  $W > 50\%$  - до його зниження. Найбільший вплив перемішування матеріалу має на рівномірність сушіння  $\Delta W$ . При кількості тонких шарів  $n \leq 10$ , вологості матеріалу  $W < 65\%$  і однакової періодичності перемішування, величину  $\Delta W$  а достатньою для розрахунків точністю можна визначити по формулі

$$\Delta W = \frac{\Delta W_0}{m+1} \quad (31)$$

де  $\Delta W_0$  - нерівномірність вологості подрібненої деревини при сушінні її без перемішування, %.

При більш високих значеннях  $n$  і  $W_0$  вплив перемішування на нерівномірність сушіння знижується.

Виходячи з отриманих результатів видно, що незначне зниження інтенсивності процесу і суттєве підвищення рівномірності сушіння при зниженні температури нагріву матеріалу при його перемішуванні, дозволить рекомендувати цей технологічний прийом як ефективний технічний засіб в сушарках різного типу.

Таб. 4.1.

Nu=0.00527*Re^4.01*(d/l)^3										
dL\Re	50.000	100.000	150.000	200.000	250.000	300.000	350.000	400.000	450.000	
0.001	3.49E-05	5.62E-04	2.86E-03	9.06E-03	2.22E-02	4.61E-02	8.54E-02	1.46E-01	2.34E-01	
0.006	7.54E-03	1.21E-01	6.17E-01	1.96E+00	4.79E+00	9.95E+00	1.85E+01	3.15E+01	5.06E+01	
0.011	4.65E-02	7.48E-01	3.80E+00	1.21E+01	2.95E+01	6.13E+01	1.14E+02	1.94E+02	3.12E+02	
0.016	1.43E-01	2.30E+00	1.17E+01	3.71E+01	9.08E+01	1.89E+02	3.50E+02	5.98E+02	9.59E+02	
0.021	3.23E-01	5.21E+00	2.65E+01	8.39E+01	2.05E+02	4.26E+02	7.91E+02	1.35E+03	2.17E+03	
0.026	6.13E-01	9.88E+00	5.02E+01	1.59E+02	3.90E+02	8.09E+02	1.50E+03	2.57E+03	4.11E+03	
0.031	1.04E+00	1.68E+01	8.52E+01	2.70E+02	6.60E+02	1.37E+03	2.55E+03	4.35E+03	6.97E+03	
0.036	1.63E+00	2.62E+01	1.33E+02	4.23E+02	1.03E+03	2.15E+03	3.99E+03	6.81E+03	1.09E+04	
0.041	2.41E+00	3.88E+01	1.97E+02	6.24E+02	1.53E+03	3.17E+03	5.89E+03	1.01E+04	1.61E+04	
0.046	3.40E+00	5.47E+01	2.78E+02	8.82E+02	2.16E+03	4.48E+03	8.32E+03	1.42E+04	2.28E+04	
0.051	4.63E+00	7.46E+01	3.79E+02	1.20E+03	2.94E+03	6.11E+03	1.13E+04	1.94E+04	3.11E+04	
0.056	6.13E+00	9.88E+01	5.02E+02	1.59E+03	3.89E+03	8.09E+03	1.50E+04	2.56E+04	4.11E+04	
0.061	7.92E+00	1.28E+02	6.49E+02	2.06E+03	5.03E+03	1.05E+04	1.94E+04	3.31E+04	5.31E+04	
0.066	1.00E+01	1.62E+02	8.22E+02	2.60E+03	6.37E+03	1.32E+04	2.46E+04	4.20E+04	6.73E+04	
0.071	1.25E+01	2.01E+02	1.02E+03	3.24E+03	7.93E+03	1.65E+04	3.06E+04	5.22E+04	8.38E+04	
0.076	1.53E+01	2.47E+02	1.25E+03	3.98E+03	9.73E+03	2.02E+04	3.75E+04	6.41E+04	1.03E+05	
0.081	1.85E+01	2.99E+02	1.52E+03	4.81E+03	1.18E+04	2.45E+04	4.54E+04	7.76E+04	1.24E+05	
0.086	2.22E+01	3.58E+02	1.82E+03	5.76E+03	1.41E+04	2.93E+04	5.43E+04	9.28E+04	1.49E+05	
0.091	2.63E+01	4.24E+02	2.15E+03	6.83E+03	1.67E+04	3.47E+04	6.44E+04	1.10E+05	1.76E+05	
0.096	3.09E+01	4.97E+02	2.53E+03	8.02E+03	1.96E+04	4.07E+04	7.56E+04	1.29E+05	2.07E+05	
0.101	3.60E+01	5.79E+02	2.94E+03	9.33E+03	2.28E+04	4.74E+04	8.80E+04	1.50E+05	2.41E+05	

Таб. 4.2.

Nu=(0.316/(10^6))*Re^4.01*Gu*2.53										
Gu\Re	50.000	75.000	100.000	125.000	150.000	175.000	200.000	225.000	250.000	
0.150	1.69E-02	8.59E-02	2.72E-01	6.67E-01	1.38E+00	2.57E+00	4.39E+00	7.04E+00	1.07E+01	
0.175	2.50E-02	1.27E-01	4.02E-01	9.84E-01	2.05E+00	3.79E+00	6.48E+00	1.04E+01	1.59E+01	
0.200	3.50E-02	1.78E-01	5.64E-01	1.38E+00	2.87E+00	5.32E+00	9.09E+00	1.46E+01	2.22E+01	
0.225	4.72E-02	2.40E-01	7.60E-01	1.86E+00	3.86E+00	7.17E+00	1.22E+01	1.96E+01	3.00E+01	
0.250	6.16E-02	3.13E-01	9.92E-01	2.43E+00	5.04E+00	9.36E+00	1.60E+01	2.56E+01	3.91E+01	
0.275	7.84E-02	3.98E-01	1.26E+00	3.09E+00	6.42E+00	1.19E+01	2.03E+01	3.26E+01	4.98E+01	
0.300	9.77E-02	4.96E-01	1.57E+00	3.85E+00	8.00E+00	1.48E+01	2.53E+01	4.06E+01	6.20E+01	

Nu=(0.316/(10^6))*Re^4.01*Gu*2.53										
Gu\Re	275.000	300.000	325.000	350.000	375.000	400.000	425.000	450.000	475.000	
0.150	1.57E+01	2.23E+01	3.08E+01	4.14E+01	5.46E+01	7.07E+01	9.02E+01	1.13E+02	1.41E+02	
0.175	2.32E+01	3.29E+01	4.54E+01	6.11E+01	8.06E+01	1.04E+02	1.33E+02	1.67E+02	2.08E+02	
0.200	3.26E+01	4.62E+01	6.37E+01	8.57E+01	1.13E+02	1.46E+02	1.87E+02	2.35E+02	2.92E+02	
0.225	4.39E+01	6.22E+01	8.58E+01	1.15E+02	1.52E+02	1.97E+02	2.52E+02	3.16E+02	3.93E+02	
0.250	5.73E+01	8.12E+01	1.12E+02	1.51E+02	1.99E+02	2.57E+02	3.29E+02	4.13E+02	5.13E+02	
0.275	7.29E+01	1.03E+02	1.43E+02	1.92E+02	2.53E+02	3.28E+02	4.18E+02	5.26E+02	6.53E+02	
0.300	9.09E+01	1.29E+02	1.78E+02	2.39E+02	3.15E+02	4.08E+02	5.21E+02	6.55E+02	8.13E+02	

## 5. АЕРОДИНАМІКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ПОДРІВНЕНОЇ ДЕРЕВИНИ В ЩІЛЬНОМУ ШАРІ

Вирішення задач розробки енергозберігаючих режимів сушіння подрібнених відходів деревини в щільному шарі обумовлює необхідність проведення комплексу досліджень пов'язаних з фізичним моделюванням та розрахунком аеродинаміки, з врахуванням структури висушуваного матеріалу і граничних умов протікання процесу.

Розподіл теплоссія в щільному шарі дисперсних матеріалів при паралельно-струминній течії досліджувався різними авторами. Особливої уваги заслуговують роботи Чукіна В.В., Куанецова Р.Ф., які експериментально підтвердили теоретичні положення про вирівнювання поля швидкостей в шарі при збільшенні теплового потоку.

Значний об'єм досліджень з питань просторового розподілу параметричних полів швидкостей по робочому об'ємі силучого матеріалу припадає на роботи Уколова С.В., Фільчакова П.Ф., з яких на базі електрогідродинамічної аналогії вирішено ряд актуальних задач з даної тематики.

На сьогодні інтенсивно розвиваються дослідження аеродинамічних систем з використанням комбінованих методів, побудованих на теоретико-експериментальних підходах.

При синтезі теоретичної моделі фільтрації теплоссія в недеформованому пористому середовищі використовують рівняння Нав'є - Стокса:

$$\overline{(\nabla \Delta)} \overline{v} - 1/\rho \overline{\nabla p} + \mu/\rho \overline{\nabla \nabla} \overline{v} + g \quad (32)$$

де  $\overline{v}$  - вектор швидкості в даній точці потоку;

$\rho$  - густина теплоссія;

$\mu$  - динамічна в'язкість теплоссія.

Нехтуючи впливом гравітаційних сил для визначення перепаду тиску вдовж потоку, який пронизує щільний шар висушуваного матеріалу використовують розрахункове співвідношення

$$\frac{dP}{dL} = \rho(v \Delta) + \mu \nabla v \quad (33)$$

$\Delta v$  - середня швидкість теплоносія по січченню сушильної камери.

Перша складова (32) характеризує сили інерції, а друга - сили в'язкості в системі.

Характер течії і залежність втрати напору від швидкості визначаються співвідношенням цих складових. Точний аналітичний розв'язок даної задачі пов'язаний з певними труднощами, обумовленими невизначеністю геометрії границь теплового потоку в шарі матеріалу. Тому при теоретичному дослідженні залежності спадання напору від швидкості теплового потоку, геометричних параметрів шару матеріалу і фізичних властивостей теплоносія використовують ідеалізовані моделі його структури.

Ці задачі є змішаними, оскільки по відношенню до граничних поверхонь дисперсного матеріалу існує внутрішня і зовнішня течія теплоносія.

Питання дослідження розподілу агенту сушіння з радіальним проникненням шару висушуваного матеріалу в технічній літературі недостатньо висвітлені. Відомо лише декілька робіт, присвячених вивченню опору при радіальній течії теплоагенту в щільному шарі. Це роботи Аніськіна В.І., Рибарука В.Я., Драгаліна К.В., Couin C. Nukill W.V., в яких запропоновані емпіричні залежності розрахунку опору при радіальному проникненні шару подрібненого матеріалу.

Даний етап досліджень характеризується широким використанням статистичних методів розрахунку аеродинамічних систем. Та обставина, що пасивні методи дозволяють отримати математичну модель процесу без порушення нормального функціонування системи і без постановки спеціальних експериментів, розширяє сферу їх практичного впровадження в інженерну практику. Разом з цим відзначаємо, що можливості пасивного методу при розрахунку аеродинамічних систем, які характеризуються в багатьох випадках збуреннями статистичного характеру, дещо обмежені. Встановлено, що пасивний метод дає задовільні для практики результати лише в умовах некорельованих збурень, що не завжди спостерігається в реальних умовах аеродинамічних

систем.

Внутрішня задача, пов'язана з дослідженням ламінарного режиму, і вона на сьогодні найбільш повно розроблена і успішно використовується для розрахунку гідродинамічних систем в умовах пористого середовища. При наявності переваги сил інерції (по аналогії з течією рідини в трубах) для розрахунку перепаду тиску вдовж теплового потоку використовують рівняння Дарсі-Вейсбаха.

$$\frac{\Delta P}{L} = \lambda_{тр} \frac{\rho v^2}{2g} \quad (34)$$

$\lambda_{тр}$  - коефіцієнт гідравлічного опору.

Детальний аналіз досліджень, пов'язаних з вивченням даного Аеровим М.Е. та Годесом О.М.

Встановлено, що при малих значеннях чисел Рейнольдса при пронизуванні щільного шару подрібненого матеріалу має місце як ламінарний, так і турбулентний рух. Для врахування впливу в'язкого тертя і інерційних сил на перепад тиску в тепловому потоці використовується розрахункове співвідношення

$$\frac{\Delta P}{L} = av + bv^2 \quad (35)$$

яке, при малих значеннях чисел Рейнольдса переходить в опір а чисто в'язким тертям і відповідно виникає необхідність враховувати інерційні сили.

У відповідності з наведеною методикою в розрізі запланованих досліджень проведено теоретичне і експериментальне обґрунтування основних аеродинамічних характеристик досліджуваного процесу.

Для визначення перепаду тиску вдовж теплового потоку в шарі висушуваного матеріалу використовувалось розрахункове співвідношення

$$\frac{\Delta P}{L} = K \eta' S_v \frac{z (1-\epsilon)^2}{3} r + \frac{\beta' S_v \eta}{8} + \frac{1-\epsilon}{z^3} v^2, \quad (36)$$

- де  $K$  - постійна Когені-Кармана;  
 $\eta$  - коефіцієнт динамічної в'язкості сушильного агенту;  
 $S_y$  - питома поверхня шару висушуваного матеріалу;  
 $\varepsilon$  - щільність шару висушуваного матеріалу;  
 $\beta$  - постійний коефіцієнт.

Встановлено, що на висоті більше 200 мм від входу потоку теплоносії рівномірно розподіляється по січченню сушильного апарату і що товщина шару висушуваного матеріалу після розкриття струмнини практично не впливає на розподіл потоку в шарі.

#### 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТА ДИНАМІКИ СУШІННЯ ПОДРІБНЕНИХ ВІДХОДІВ ДЕРЕВИНИ В УСТАНОВЦІ ЩІЛЬНОГО ШАРУ

Проведені в попередніх розділах дослідження дозволили створити математичні моделі процесу сушіння подрібненої деревини для тонкого шару, нерухомого щільного шару та щільного шару при перемішуванні в ньому подрібненої деревини. Розроблені математичні моделі дозволяють для кожного конкретного випадку сушіння подрібненої деревини використовувати одну з них і отримувати відповідні результати без врахування особливостей аеродинаміки потокових систем в сушарках.

З метою узагальнення результатів експериментальних досліджень процесу сушіння була використана теорія подібності, яка дає змогу описати явища подібного класу. В результаті проведених експериментальних досліджень отримані криві сушіння, криві швидкості сушіння для різних товщин щільного шару, температур агенту обробки, швидкості руху агенту обробки, порід і розмірів подрібненої деревини, які послужили вихідними даними для математичного опису кінетики та динаміки процесу сушіння на основі фізичного та математичного моделювання. На рис. 6.2. наведені криві сушіння і швидкості сушіння для різних товщин щільного шару. Товщина щільного шару вибиралась на основі результатів, отриманих в розділі 5, тобто не менше 200 мм. Аналогічні криві отримані для різних порід деревини, температур і швидкості агенту обробки.

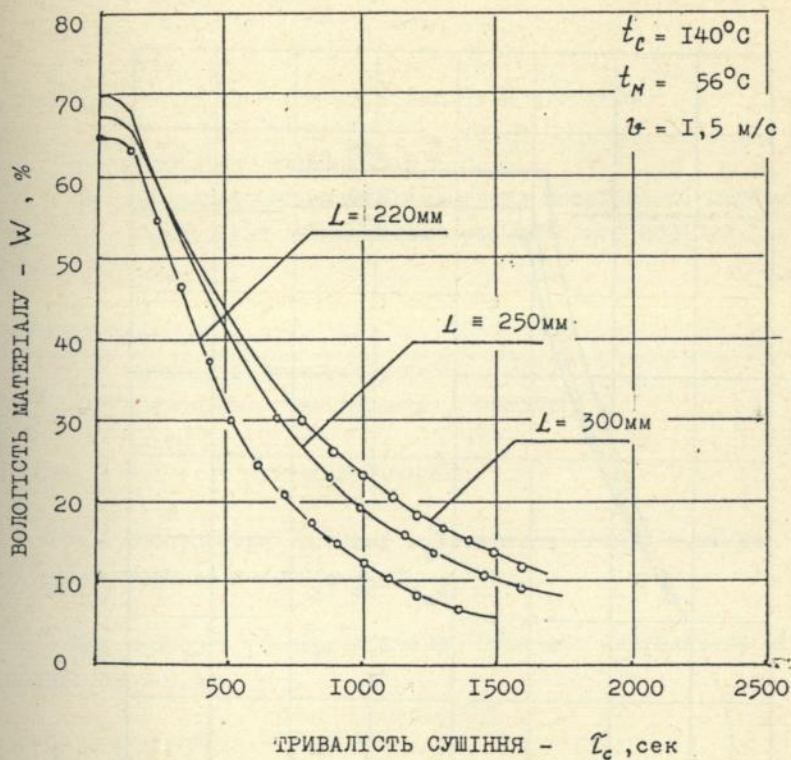


Рис. 6.1. Криві сушіння

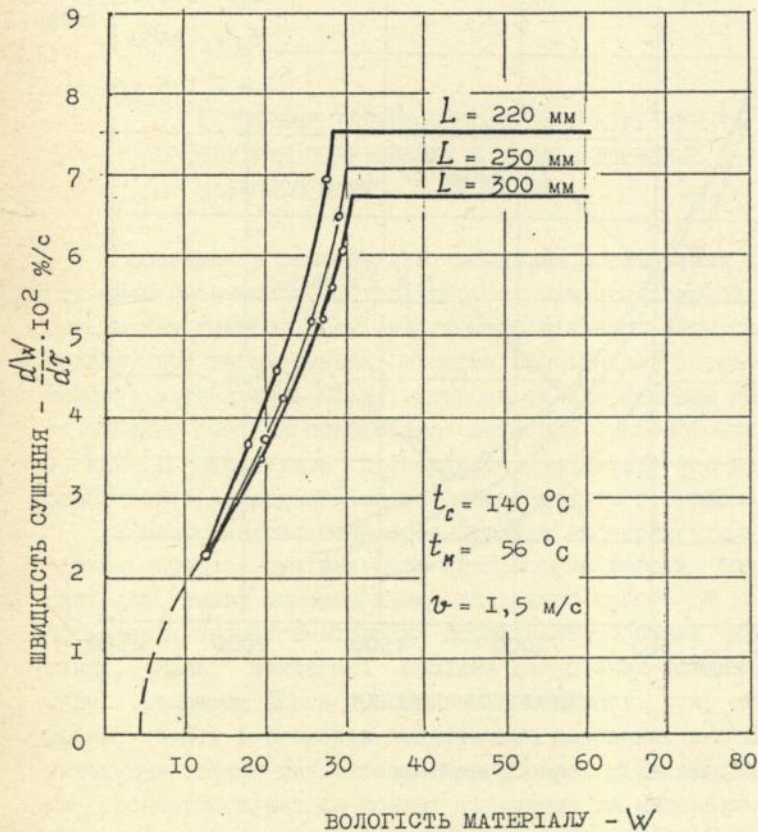


Рис. 6.2. Криві швидкості сушіння

Математична обробка експериментальних даних дозволила отримати узагальнені критеріальні рівняння для визначення теплообмінного критерію Нусельта,  $(Nu)$ , гаєдинамічного критерію гомогрешності,  $(No)$ .

Для теплообмінного критерію Нусельта, ускладненого ма-  
сообміном отримано узагальнююче рівняння, (рис. 6.3.),

$$Nu = 0,316 Re^{0,4} G_u^{2,53} \left( \frac{d_e}{L} \right)^{3,0} \quad (37)$$

де  $Nu = \frac{\alpha d_e}{L}$  - теплообмінний критерій Нусельта;

$\alpha$  - коефіцієнт теплообміну;

$d_e$  - еквівалентний діаметр частинки подрібненої деревини;

$\lambda_c$  - коефіцієнт теплопровідності вологого повітря;

$Re = \frac{v d_e}{\nu}$  - критерій Рейнольдса;

$v$  - швидкість агенту обробки;

$\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості;

$G_u = \frac{t_c - t_M}{T_c}$  - критерій Гухмана;

$t_M$  - температура "мокрого" термометра агенту сушіння;

$L$  - товщина товстого шару.

Для критерію гомохронності  $No$  отримано узагальнене рівняння, рис. 6.4.

$$No = 1,2 \cdot 10^6 Re^{0,235} G_u^{0,36} \left( \frac{d}{L} \right)^{-0,5} \quad (38)$$

Таким чином, тривалість сушіння подрібненої деревини може бути визначена двома способами, а саме:

$$\tau_{суш.} = \frac{W_n - 20}{N} + \frac{2,3}{K} \lg \frac{30}{W_k} \quad (39)$$

де  $W_n$  - початкова вологість матеріалу %;

$N$  - швидкість сушіння в першому періоді %/с;

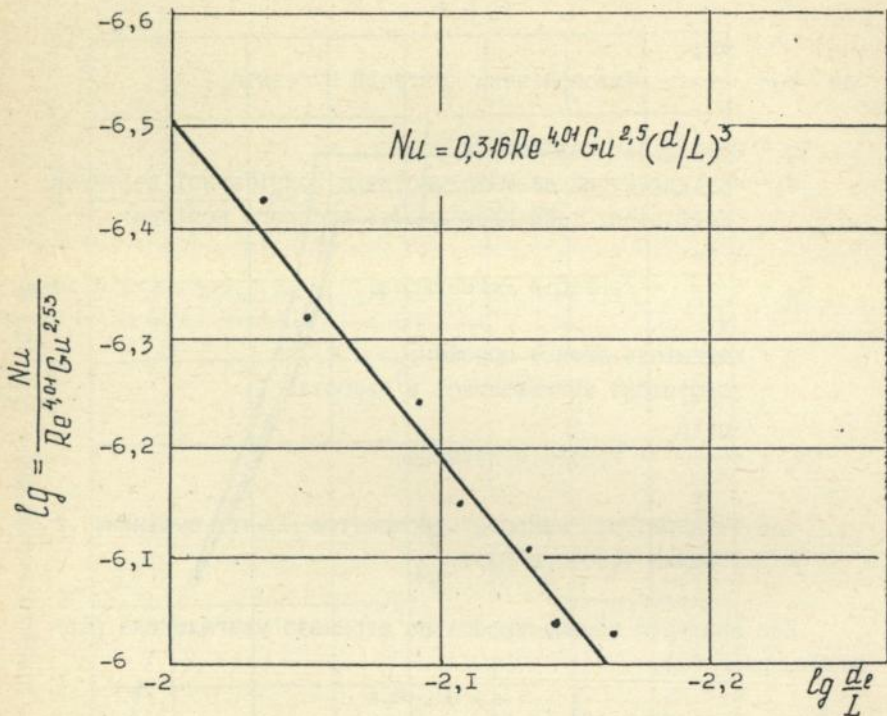


Рис.6.3. Визначення критерію Нусельта

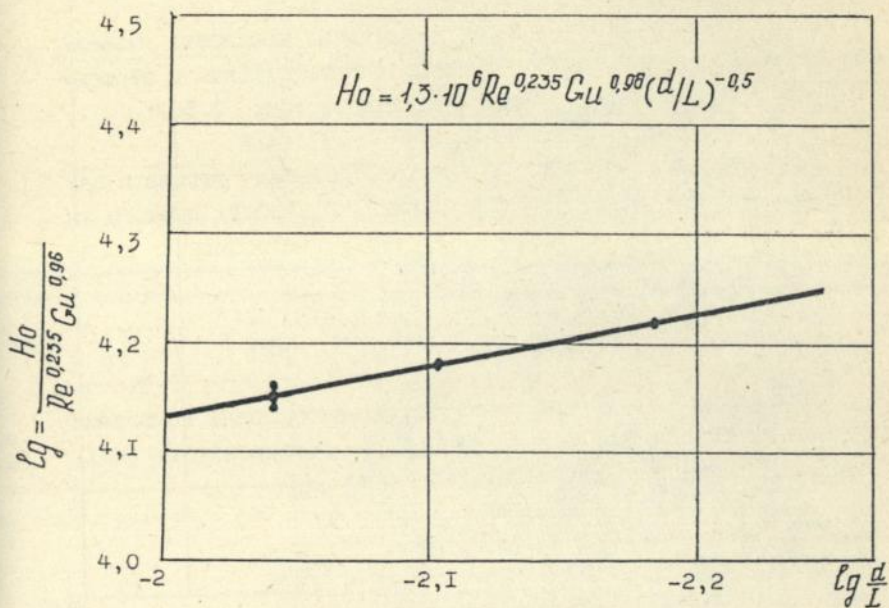


Рис.6.4. Визначення критерію  
гомохромності I

$W_K$  - кінцева вологість матеріалу %;

$K$  - коефіцієнт сушіння в другому періоді.

Швидкість сушіння визначаємо за формулою

$$N = \frac{100 \alpha (t_g - t_M)}{r \rho_g d_g}, \quad (40)$$

де  $r$  - питома теплота випаровування, приймалась при температурі "мокрого" термометра, Дж/кг;

$\rho_g$  - базисна густина деревини, кг/м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт сушіння в періоді падаючої швидкості виявився величиною прямо пропорційною швидкості сушіння в першому періоді ( $N$ ), для якого отримано рівняння, (рис. 6.5.):

$$K = 0,0207 N \quad (41)$$

Другий спосіб є більш точним, але дозволяє отримати загальний час сушіння без врахування тривалості першого та другого періоду і визначення коефіцієнту теплообміну, а саме:

$$\tau_0 = \frac{H_0 L}{v} \quad (42)$$

На основі отриманих результатів побудовані номограми для визначення критеріїв Нусельта ( $Nu$ ), гомохронності ( $Ho$ ), тривалості сушіння подрібненої деревини.

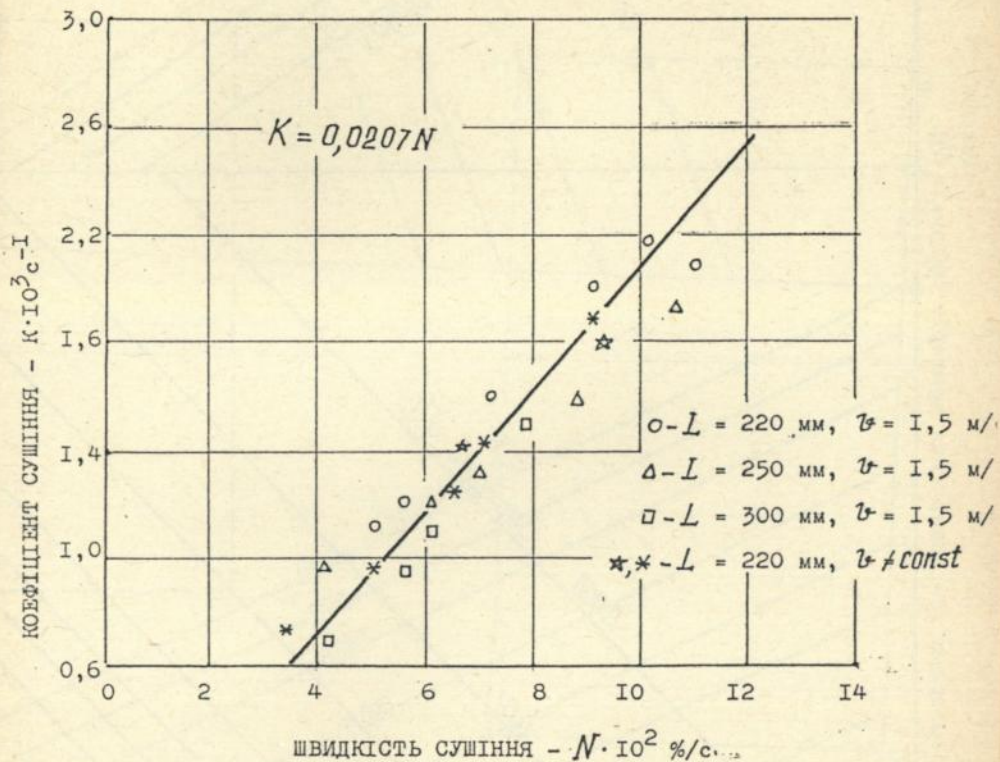
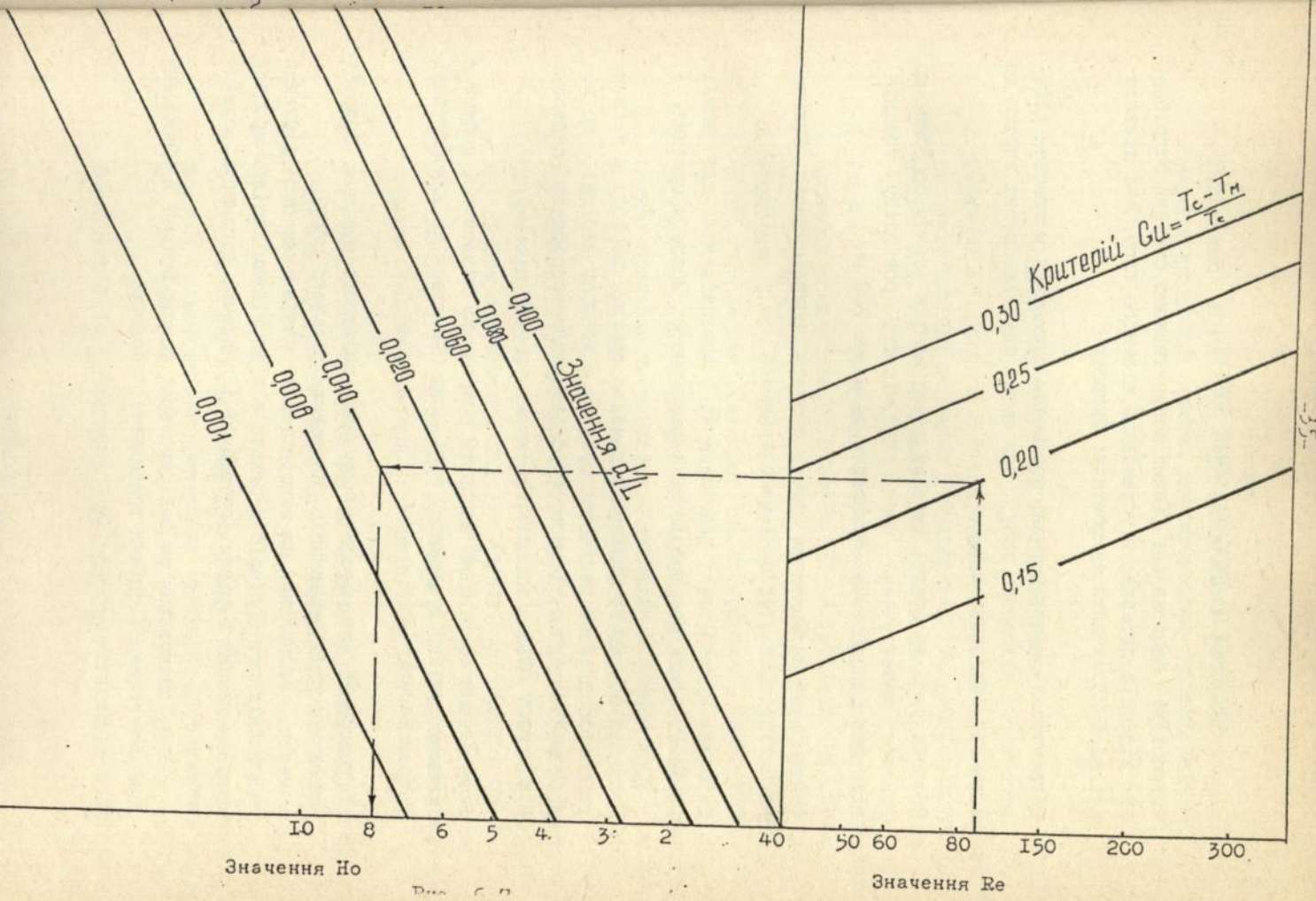
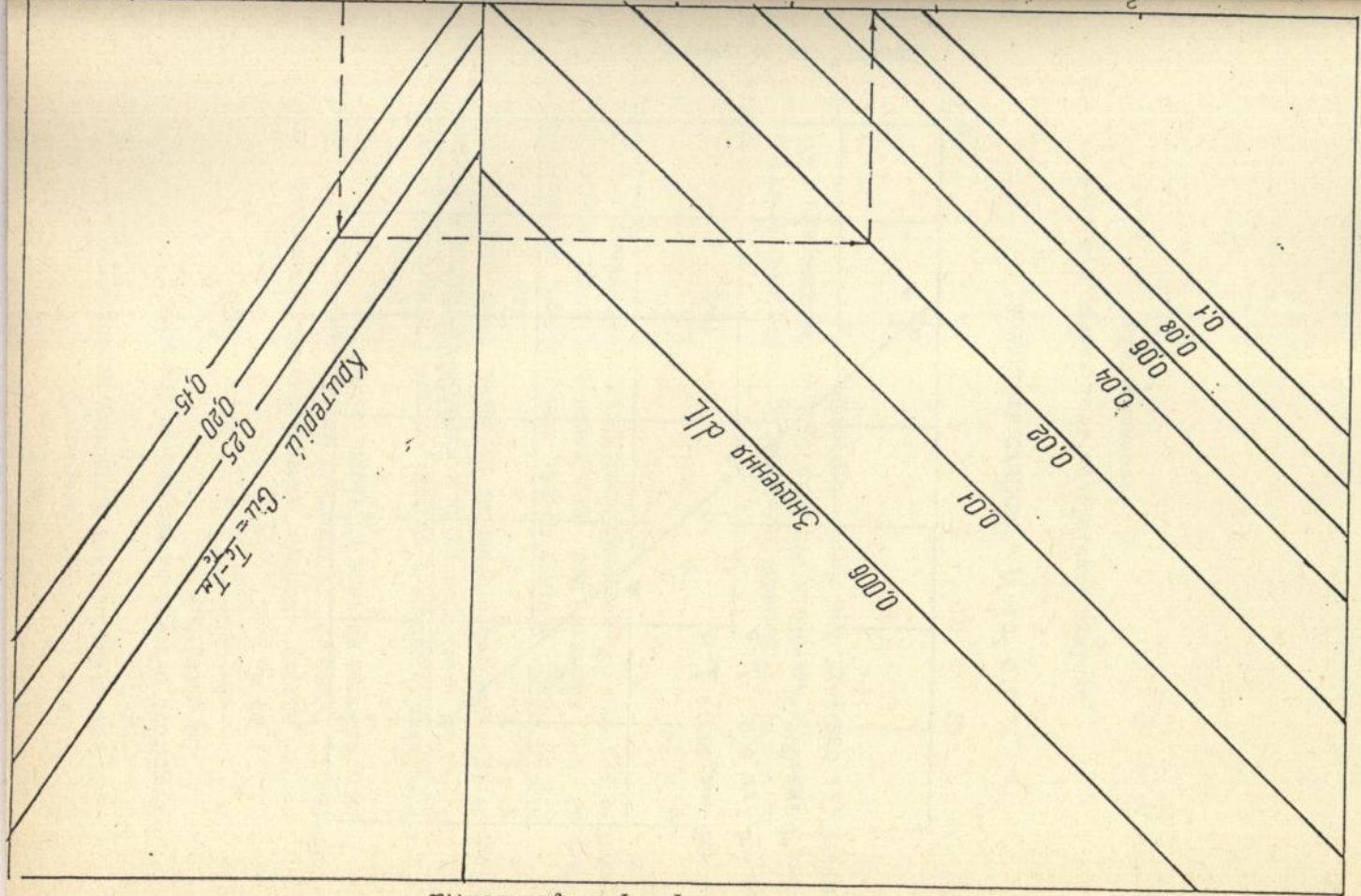


Рис. 6.5. Залежність коефіцієнта сушіння від швидкості





ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. Розроблені раціональні режими конвективного сушіння подрібнених відходів деревини в установках щільного шару, які дозволяють на 5-7% знизити енергетичні витрати.
2. Обґрунтовані конструктивні параметри сушильних установок щільного шару колонного типу; при цьому співвідношення висоти до діаметру становить 1,5.
3. Встановлено, на основі аналізу аеродинаміки агенту обробки, що з метою забезпечення його рівномірного розподілу товщина щільного шару повинна становити не менше 200 мм.
4. Синтезована математична модель процесу конвективного сушіння на базі рівнянь тепло- і масопереносу.
5. Отримані критеріальні узагальнюючі співвідношення для визначення основних теплообмінних характеристик процесу сушіння.
6. Встановлено, що коефіцієнт сушіння в другому періоді є величиною пропорційною швидкості сушіння в першому періоді, що відображає особливості процесу обезводнення подрібненої деревини в щільному шарі.
7. Розроблений ефективний алгоритм розрахунку кінетики і динаміки процесу сушіння в щільному шарі, що базується на використанні методу мереж.
8. Обґрунтовані два методи визначення тривалості сушіння подрібнених відходів деревини в установках щільного шару:
  - метод, заснований на використанні узагальнюючого рівняння теплообмінного критерію Нусельта з відповідним поділом процесу сушіння на два періоди (постійної і падаючої швидкості сушіння);
  - метод, заснований на базі критерію гомохронності з визначенням інтегральної оцінки тривалості процесу.

9. Побудовані номограми, що дозволяють за допомогою інженерних методів визначити основні характеристики процесу сушіння.

Публікації здобувача по темі дисертації

1. Гірник М.Л., Вороков В.Р., Борисенко Т.І. та ін. Автоматизація процесів сушіння деревини у будівельній індустрії: структурний синтез САК. // - К.:Будівельник, 1992.-184с.
2. Гірник М.Л., Борисенко Т.І. та ін. Математичне моделювання процесів конвективного сушіння. // - К.:Будівельник, 1993.-248с
3. Борисенко Т.І., Гербеи В.М. Методи інтенсифікації процесів сушіння. // Харків :Технологічна кібернетика, 1993.-170с.
4. Борисенко Т.І., Гербеи В.М. Математичне моделювання теплообмінних процесів в сушильних установках щільного шару. // Харків :Технологічна кібернетика, 1993.-192с.
5. Борисенко Т.І., Бубняк Т.І., Федоров О.В. Розробка алгоритму оцінювання вектора температурновологісного стану лісоосушальної камери періодичної дії.// - Харків.:АН, 1993р.- 3с.
6. Борисенко Т.І., Бубняк Т.І., Книш В.Л. Моделювання кінетики процесу сушіння деревини.// -Харків.:АН, 1993.-5с.
7. Борисенко Т.І., Фізична модель процесу переміщення вільної вологи при нагріванні деревини // -Харків.:АН, 1993.-3с.
8. Борисенко Т.І., Аналітичне дослідження динамічних властивостей процесу сушіння дрібнодисперсних фракцій деревини // -Харків.:АН, 1993.-6с.
9. Борисенко Т.І., Гнатишин Я.М., Експериментальне дослідження

основних теплофізичних характеристик подрібнених деревинних відходів // -Харків.:АН, 1993.-12с.

10. Борисенко Т.І., Дослідження фізико-механічних характеристик подрібнених відходів // -Харків.:АН, 1993.-9с.
11. Борисенко Т.І., Бубняк Т.І., Оптимізація процесу конвективного сушіння // -Харків.:АН, 1993.-10с.
12. Борисенко Т.І. Дослідження коефіцієнту теплообміну в періоді постійної швидкості конвективного сушіння деревини // -Харків.:АН, 1993.-5с.
13. Борисенко Т.І., Ханік Я.М., Аксельруд Р.А., Атаманюк В.М., Стремко М.П. Математична модель фільтраційного процесу сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів // -Харків.:АН, 1993.-18с.
14. Борисенко Т.І., До розрахунку процесу сушіння тонкого шару подрібненої деревини // -Харків.:АН, 1993.-3с.
15. Борисенко Т.І. Розрахунок кінетики процесу сушіння подрібнених відходів деревини в щільному шарі на базі теорії подібності // -Харків.:АН, 1993.-4с.
16. Борисенко Т.І. Аналітичний розв'язок задачі веродинаміки сушальних установок щільного шару подрібнених відходів деревини // -Харків.:АН, 1993.-4с.
17. Борисенко Т.І. Розрахунок процесів сушіння подрібненої деревини з використанням методу сіток // -Харків.:АН, 1993.-4с.
18. Борисенко Т.І., Гербей В.М. Математичне моделювання теплообмінних процесів в сушальних установках щільного шару // -Харків.:Технологічна кібернетика, 1993.-189с.
19. Гіриник М.Я., Гнатилин Я.М., Борисенко Т.І., Гербей В.М. Дослідження термодинамічних процесів в деревообробці // -Ль-

вів:Укр.ДЛУ, 1993.-25с.

20. Гірник М.Л., Гербей В.М., Борисенко Т.І., Озарків І.М. Михайловський А.Р. Гідротермічна обробка деревини // -Львів:ДЛТІ 1991.-42с.
21. Гірник М.Л., Гнатишин Я.М., Борисенко Т.І., Розрахунок теплових систем // -Львів:Укр.ДЛУ,1993.-27с.
22. Гірник М.Л., Гнатишин Я.М., Борисенко Т.І., Гербей В.М. Розрахунок статичних і динамічних характеристик теплообмінників // -Львів:Укр.ДЛУ, 1993.-23с.
23. Гірник М.Л., Ільницький І.М., Новіков В.І., Собко В.М., Борисенко Т.І., Аналітичний метод розрахунку кінетики сушіння подріблених відходів деревини //Львів-Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-5с.
24. Гірник М.Л., Ільницький І.М., Новіков В.І., Борисенко Т.І. Аеродинаміка процесу сушіння подрібненої деревини в щільному шарі // - Львів-Харків.:Технологічна кібернетика, 1993.-5с.
25. Борисенко Т.І. Інженерні методи розрахунку кінетики і динаміки сушіння деревини // -Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-115с.
26. Гірник М.Л., Федоткін І.М., Дудчак Д.Л., Гербей В.М., Борисенко Т., Сорока Л.Я. Применение вероятностных и детерминистических методов при решении технологических задач в деревообрабатывающей и строительной промышленности // -Київ:Технологічна кібернетика,1993.-211с.
27. Гербей В.М., Гірник М.Л., Дудчак М.І., Борисенко Т.І. Основи проектування сушильних цехів // -Київ:Будівельник, 1992. -312с.
28. Гірник М.Л., Степура О.І., Борисенко Т.І., Гербей В.М. Визначення імпульсної перехідної функції ідентифікованого об'єкту з

- використанням індексних послідовностей -Львів-Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-7с.
29. Гербей В.М., Борисенко Т.І., Гнатишин Я.М. Дослідження коефіцієнта сушіння в період падаючої швидкості -Львів-Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-7с.
30. Борисенко Т.І. Числовий метод рішення рівнянь тепло- і масообміну -Львів-Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-3с.
31. Борисенко Т.І., Гірник М.Л., Гербей В.М., Садовський Ю.А. Дослідження опостережливості і керуваності багатомірних тепло-масообмінних систем -Львів-Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-5с.
32. Борисенко Т.І., Гербей В.М., Басалига Є.В., Гірник М.Л. Моделювання процесу діелектричного сушіння деревини -Львів-Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-9с.
33. Гнатишин Я.М., Борисенко Т.І., Ляляк І.М. Експериментальне дослідження процесів сушіння подрібнених відходів в устатковках колонного типу, експериментальне дослідження основних закономірностей кінетики сушіння -Львів-Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-7с.
34. Новікова С.Ф., Борисенко Т.І., Книш В.Ф. Дослідження статистичних характеристик лісосушильної камери -Львів-Харків:Технологічна кібернетика, 1993.-4с.





464615

**AV 28.801**