

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ СУШІННЯ ПИЛОМАТЕРІАЛІВ З ВІЛЬХИ

*О.О. Пінчевська, доктор технічних наук, професор*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*Запропоновано метод розрахунку дисперсії кінцевої вологості пиломатеріалів у сучасних камерах за умови описання процесу сушіння стохастичною моделлю з мінливими початковими та граничними умовами. Представлено описання процесу сушіння з урахуванням термовологопровідності, на підставі якого розроблений адекватний метод розрахунку кінетики сушіння. Розрахункові та експериментальні криві поточної дисперсії вологості вільхових пиломатеріалів мали задовільну збіжність, що дає можливість прогнозувати якість їх сушіння в камерах різних конструкцій.*

**Ключові слова:** *пилопродукція, деревина вільхи, кінетика сушіння, якість сушіння, дисперсія кінцевої вологості.*

Під час сушіння формується значна кількість споживчих властивостей майбутньої готової продукції з деревини, тому сушінню пиломатеріалів належить важливе місце в технологічному процесі виготовлення деревних виробів. Внаслідок неякісного сушіння виробу в процесі експлуатації можуть втратити свої функціональні властивості. Можливість прогнозування якості сушіння на основі теоретичних розрахунків звільнює від довготривалих та витратних експериментальних досліджень, забезпечує раціональне використання деревних порід, наприклад, вільхи.

Деревина є матеріалом рослинного походження, якому притаманна значна мінливість властивостей. На її фізико-механічні властивості впливає багато факторів, як-то порода, регіон та умови росту, кліматичні умови, наявність вологи, вад тощо, які самі є випадковими. В довідковій літературі наводяться середні значення параметрів фізико-механічних властивостей

певних порід, але не вказана їх мінливість. Використання таких усереднених характеристик, що не враховують їх випадковий характер, часто призводить до некоректних технологічних розрахунків та спрощеного моделювання процесу.

Отже, уявлення сушіння пиломатеріалів випадковим процесом та його моделювання з урахуванням мінливості властивостей деревини й сушильного агента для отримання очікуваного розсіювання кінцевої вологості в штабелі є актуальною задачею промисловості.

**Мета дослідження.** Розробити метод прогнозування якості сушіння пилопродукції з вільхи.

**Матеріали і методика досліджень.** Для прогнозу якості сушіння пиломатеріалів раціонально використати модель процесу сушіння з випадковими початковими і граничними умовами. Рішення цієї задачі у вигляді моментних рівнянь для математичного сподівання та дисперсії кінцевої вологості пиломатеріалів було отримано М.Н. Феллером [7]. Практичне використання цих рівнянь можливе після експериментального визначення дисперсії початкової  $d_{W_0}$  та рівноважної вологості пиломатеріалів  $d_{W_p}$ , дисперсії коефіцієнтів вологопровідності  $d_\alpha$  та вологообміну  $d_\alpha$ . Із наведених параметрів визначення трьох перших не викликає труднощів. Визначення мінливості коефіцієнта вологопровідності ускладнюється необхідністю проведення довготривалих експериментів, оскільки в літературних джерелах відсутні не тільки ці дані, а й середні значення коефіцієнтів вологопровідності для багатьох порід деревини. Тому цей параметр було прийнято детермінованим.

Отже, алгоритм розрахунку дисперсії кінцевої вологості пиломатеріалів з урахуванням наступних випадкових величин – початкової вологості пиломатеріалів, коефіцієнта вологообміну та рівноважної вологості має вигляд:

$$d^{(n)}_W = \left( \frac{W_{nep}^{(n)} - W_p^{(n)}}{W_{nep}^{(n-1)} - W_p^{(n)}} \right)^2 d_W^{(n-1)} + d_{W_p}^n, \quad (1)$$

де  $n$  – індекс ступеня режиму;

$W_{nep}^{(n)}$  – значення перехідної вологості на  $n$ -ому ступені режиму;

$W_{nep}^{(n-1)}$  – значення перехідної вологості на попередньому ступені режиму,  
для початкових умов  $W_{nep}^{(n-1)} = W_0$ ,

де  $W_0$  – початкова вологість матеріалу;

$W_p^{(n)}$  – рівноважна вологість на  $n$ -ой ступені режиму;

$d_{W_p}^n$  – дисперсія рівноважної вологості на  $n$ -ому ступені режиму;

$d_W^{(n-1)}$  – дисперсія поточної вологості на  $(n-1)$ -ому ступені режиму, при  $n=0$   
дорівнює дисперсії початкової вологості  $d_{w_0}$ .

Рівняння (1) було отримано при рішенні відомого рівняння вологопровідності. Значення поточної і перехідної вологостей, що входять до нього, визначаються з експоненціальної кривої кінетики сушіння, що обмежує використання алгоритму. Для можливості застосування вищенаведеного рівняння для низькотемпературних сушарок необхідно знайти рівняння для математичного сподівання, яке б враховувало особливості проведення процесу.

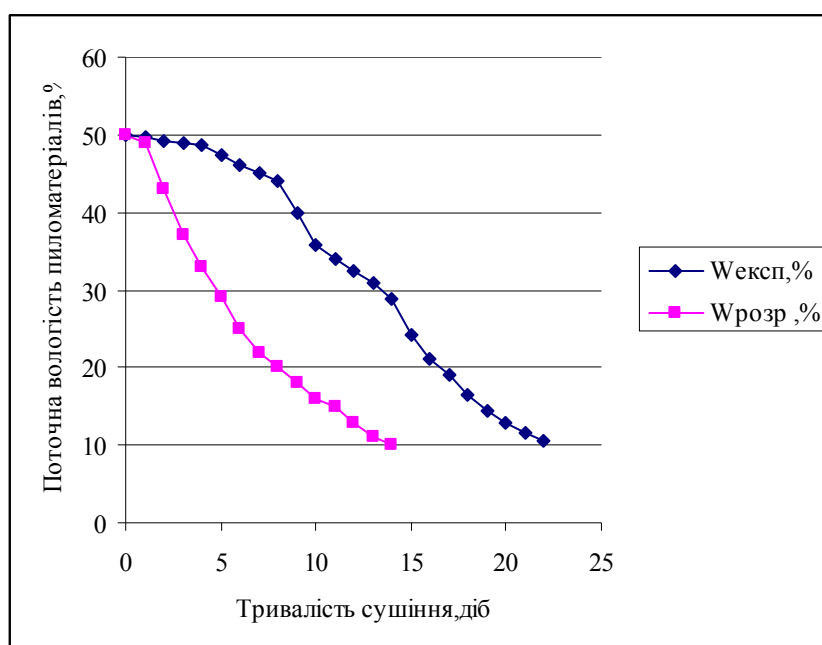
З цією метою було досліджено кінетику сушіння пиломатеріалів з вільхи, оскільки саме вільха останнім часом набула великої популярності при виготовленні меблів. Досвід сушіння пиломатеріалів з вільхи поки базується на теоретично необґрунтованих рекомендаціях, побудованих без знання теплофізичних параметрів цієї породи. Досягти якісного сушіння за таких умов досить важко, навіть при застосуванні м'яких режимів сушіння, що рекомендовані для сучасних камер з водяним теплопостачанням.

Відтворення традиційної технології прогрівання деревини перед сушінням в насиченому середовищі є економічно не вигідним у камерах з водяним теплопостачанням, тому сучасна технологія сушіння загалом не передбачає попереднього нагрівання деревини при підвищеній температурі сушильного агента. Це пов'язано також з бажанням зберегти природній колір деревини, оскільки прогрівання при підвищеній температурі та високій відносній вологості викликає її потемніння.

Процес нагрівання штабелю відбувається через поступове збільшення температури до показника першого ступеня режиму сушіння. Ступінь

насичення середовища при цьому підтримується таким, щоб запобігати конденсації вологи на матеріалі, яка зволожує поверхню і тим самим сприяє осушенню повітря –  $\varphi = 80-85\%$ . Крім того, зайву вологу необхідно потім видаляти з камери, що підвищує собівартість сушіння.

На відміну від попереднього прогрівання деревини в насиченому середовищі, поступове прогрівання супроводжується видаленням води з матеріалу з невеликою швидкістю [4]. Криві сушіння за таких умов суттєво відрізняються (рис. 1). Вони мають S-подібну форму або форму подвійної експоненти. Порівняння їх з кривими, побудованими із застосуванням тільки рівняння вологопровідності, дає велику похибку  $\Delta\tau = 0,4-0,6\tau$ .



**Рис. 1. Криві сушіння пиломатеріалів з вільхи товщиною 50 мм:**

Wтеор, розрахована за рівнянням вологопровідності та Wексп, отримана при сушінні в камерах з водним теплопостачанням у виробничих умовах.

Це пов'язано з відсутністю у розрахунковому рівнянні кінетики сушіння складової, яка враховує перерозподіл вологи в деревині, що не дозволяє правильно відтворити характер зміни вологовмісту в штабелі протягом всього процесу і найбільша помилка має місце на початку процесу. Для врахування температурної складової на процес перерозподілу вологи в необмеженій пластині було використано рівняння, яке імітує вплив температурних полів через введення джерела вологи, що змінюється за експоненціальним законом:

$$U = U'_0 e^{-k\tau}, \quad (2)$$

де  $U'_0$  – максимальна потужність джерела;

$k$  – постійна, яка враховує відносну швидкість зміни питомої потужності джерела.

Моделювання процесу через введення джерела вологи дає можливість коригувати теоретичні криві кінетики сушіння. Причому потужність джерела змінюється залежно від режимних параметрів – тобто при кожних нових параметрах сушильного агента гальмуюча дія джерела вологи набуватиме нової сили.

Таким чином задача динаміки сушіння набуває вигляду:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = a' \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{U'_0 e^{-k\tau}}{c\rho_0}, \quad (3)$$

при початкових

$$U(x,0) = U_0 - const; \quad (4)$$

$$\frac{\partial U(0,\tau)}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

і граничних умовах

$$-a' \frac{\partial U(R,\tau)}{\partial x} + \alpha[U_p - U(R,\tau)] = 0, \quad (6)$$

де  $a'$  – коефіцієнт вологопровідності;

$\rho_0$  – густина абсолютно сухого тіла;

$c$  – питома теплоємність тіла.

Розв'язок задачі (3) у критеріальній формі наведений у [1], де показано, що для наближеного рішення достатньо використання першого члена швидкозбіжного ряду. Аналітичне визначення поточної вологості за цим рівнянням вимагає достатньо складних експериментів для розрахунків термодинамічних коефіцієнтів деревини. Цього позбавлений метод узагальнення експериментальних даних, який заснований на використанні загального рівняння масопередачі. Такий підхід запропонований у роботах [5,6]

і використовується в легкій та хімічній промисловостях при сушінні відповідних матеріалів.

Отже, поточне значення вологовмісту пиломатеріалів у наближеному вигляді має вигляд:

$$\bar{U}(\tau) = (U_0 - U_c) [D_1 e^{-K_1 \tau} - D_2 e^{-K_2 \tau}] + U_c. \quad (7)$$

Визначення поточних значень вологості за формулою (7) можливе при відомих значеннях  $K_1, K_2, D_2$  і  $a'$ . Величини коефіцієнтів вологопровідності деревини вільхи  $a'$  (відповідно  $K_1 = \frac{a'}{R^2}$ ) залежно від режимних параметрів визначаються експериментальним шляхом – методом контактного зволоження. Значення  $D_2, K_2$ , що характеризують відповідно потужність джерела вологи та швидкість її спадання, залежать від тривалості встановлених при зміні режиму сушіння температурних полів по товщині пиломатеріалу та співвідношення потужності джерел, які відповідають зміні вологості в матеріалі під дією перепадів вологісного та температурного полів.

Досліди з визначення коефіцієнта вологопровідності вільхи виконували в діапазоні температур  $t = 25, 40, 60, 80$  °С, для якого побудовані залежності для різних анатомічних напрямів:

тангенціального:

$$a'_m = 0,0059t^{1,66}, \quad (8)$$

радіального:

$$a'_p = 0,0078t^{1,62}. \quad (9)$$

Отримані залежності використані в процесі побудови рівнянь вологопровідності для деревини вільхи.

На приладі побудови теоретичних кривих сушіння пиломатеріалів з вільхи товщиною 50 мм показано порядок розрахунку поточної вологості за рівнянням. Для порівняння розрахункових та експериментальних даних були використані результати дослідження процесу сушіння цього ж матеріалу у виробничих умовах в італійських камерах фірм Termolegno, Sorcal, Nardi, що встановлені на київському підприємстві ВАТ «Видубичі». Параметри режиму –

температура  $t$  та рівноважна вологість  $W_p$ , у згаданих камерах змінюються поетапно, залежно від біжучої вологості деревини. Відповідним чином було проведено розрахунок теоретичної кривої сушіння для фактичних  $t$  та  $W_p$ .

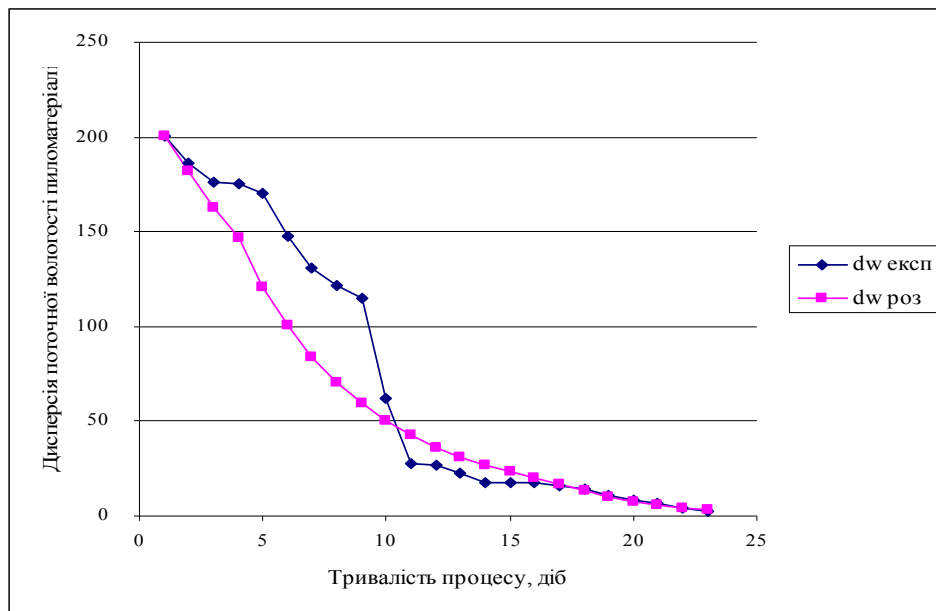
По кожному етапу розрахунку визначали коефіцієнти  $K_2$  та  $K_1$ , а також їх співвідношення, яке в середньому склало  $K_2/K_1 = 1,45$ . Такі розрахунки були проведені для п'яти сушінь. Визначені середні значення співвідношення коефіцієнтів для всіх експериментальних кривих кінетики сушіння пиломатеріалів з вільхи товщиною 50 мм, з урахуванням яких отримано розрахункове рівняння для визначення біжучої вологості:

$$W(\tau) = (W_0 - W_p) [1,6e^{-K_1\tau} - 0,6e^{-1,45K_1\tau}] + W_p. \quad (10)$$

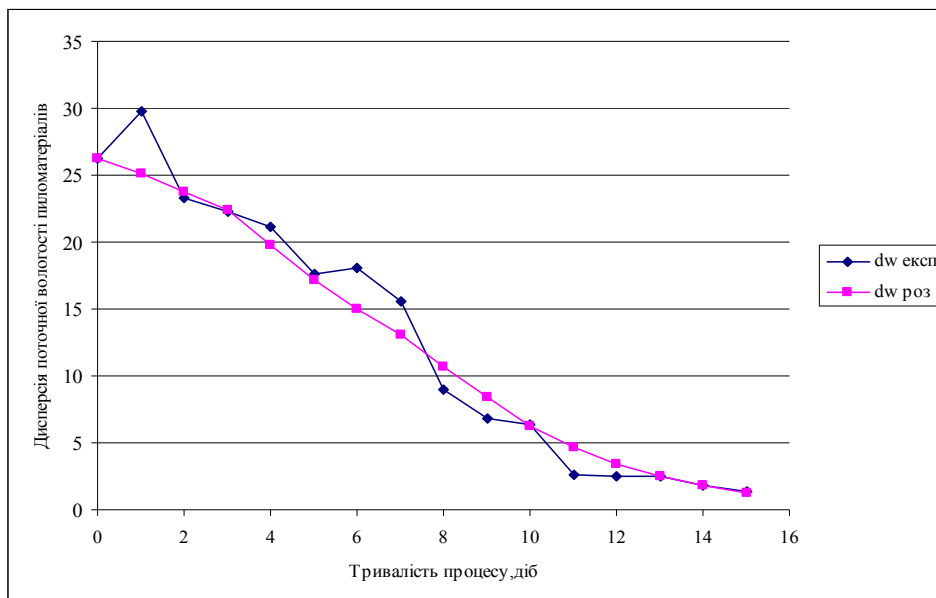
Адекватність запропонованого методу розрахунку кінетики сушіння підтверджена перевіркою однорідності середніх значень та дисперсії поточної вологості, що отримані розрахунковим та експериментальним шляхами [2]. Підґрунття для використання таких статистичних процедур забезпечили проведені дослідження [3], які довели, що розподілення кінцевої вологості пиломатеріалів підпорядковується нормальному закону.

Отримане рівняння математичного сподівання (10) використано для розрахунку очікуваної дисперсії кінцевої вологості вільхових пиломатеріалів товщиною 50 мм. Для розрахунків за рівнянням (1) використовували фактичні режимні параметри – температуру сушильного агента  $t_c$ , рівноважну вологість  $W_p$ , реалізовані в камерах італійських фірм «Termolegno», «Sorcal» та «Nardi», встановлених на ВАТ «Видубичі» (Київ). Були відібрані експериментальні криві кінетики сушіння з різною дисперсією початкової вологості. Визначена фактична дисперсія кінцевої вологості пиломатеріалів при сушінні в певній камері за результатами вимірювання вологості по зондах вологомірів. Одночасно для тих самих режимних параметрів були побудовані теоретичні криві кінетики сушіння та проведені розрахунки очікуваних дисперсій кінцевої вологості пиломатеріалів при сушінні в різних камерах – де проводився експеримент та в будь-якій з іншими аеродинамічними параметрами.

На рис. 2 наведено розрахункові та експериментальні криві зміни дисперсії вологості вільхових пиломатеріалів товщиною 50 мм з різним розсіюванням початкової вологості. Попередньо в цих камерах було експериментально визначено коефіцієнт варіації теплового поля  $V_{t_c}$ , % у штабелі пиломатеріалів, який відповідно мав такі величини:  $V_{t_c} = 15,2\%$  для камери «Termolegno» та камери «Sorcal»  $V_{t_c} = 6,95\%$ .



а



б

**Рис. 2. Криві зміни дисперсії вологості пиломатеріалів з вільхи:** розрахункова за теоретичною кривою кінетики сушіння  $d_w p. теор$ , експериментальна  $d_w експ$  під час сушіння у камерах «Sorcal» (а) та «Termolegno» (б).



У таблиці наведені результати розрахунків очікуваної дисперсії поточної вологості пиломатеріалів з вільхи з різною дисперсією початкової вологості під час сушіння однаковим режимом у камерах, де проводилися експерименти, та в камерах з аеродинамічними характеристиками, що суттєво відрізняються.

Зрозуміло, що камера «Termolegno», яка має більш рівномірно розподілене в штабелі теплове поле, привабливіша. Особливо це помітно при сушінні пиломатеріалів з незначним розкидом початкової вологості. За помірної швидкості сушіння на початку процесу відбувається підвищення дисперсії поточної вологості за рахунок гірших аеродинамічних характеристик сушарки. Тобто вплив нерівномірності розподілення параметрів сушильного агента по штабелю проявляється більшою мірою при рівномірнішій початковій вологості. Це свідчить про значну вагомість впливу початкових умов на якість сушіння і ще раз підтверджує необхідність сортування пиломатеріалів за величиною початкової вологості при завантаженні в сушарку.

Результати підрахунку дисперсії кінцевої вологості пиломатеріалів під час сушіння в камерах різних конструкцій наведені в таблиці.

#### **Розрахунок дисперсії кінцевої вологості пиломатеріалів**

Порода деревини	Початкова вологість, %	Кінцева вологість, %	Дисперсія початкової вологості	Дисперсія кінцевої вологості після сушіння в камерах	
				«Termolegno»	«Sorcal»
Вільха	43	14	26,2	1,25	4,34
	50	14	200,8	1,67	5,91

Камера «Sorcal» без відповідних заходів з удосконалення рівномірності теплового поля не може забезпечити якісного сушіння пиломатеріалів з вільхи. У разі неможливості зменшити розкид граничних умов реконструкцією сушарки, якість сушіння можна підвищити за рахунок використання пом'якшених режимів сушіння.

**Висновки.** 1. Проведені експериментальні дослідження коефіцієнта волого- провідності та вологості межі гігроскопічності вільхи дозволили отримати залежності цих величин від температури оброблюваного середовища.

2. Визначено, що криві сушіння вільхових пиломатеріалів у камерах з водяним теплопостачанням відрізняються від традиційних експоненціальних і використання рівняння вологопровідності для опису кінетики сушіння в таких камерах дає значну похибку  $\Delta\tau = 0,4 - 0,6\tau$ , що пов'язано з вагомим впливом термовологопровідності.

3. Для врахування впливу температурної складової на процес перерозподілу вологи в необмеженій пластині запропоновано моделювати вплив температурних полів через введення джерела вологи, що змінюється за експоненціальним законом. Сформовано задачу динаміки сушіння у камерах із водяним теплопостачанням, яка описує комплексну дію явища вологопровідності та термовологопровідності, що імітується шляхом введення внутрішнього джерела вологи.

4. Отримані рівняння розрахунку кривих кінетики сушіння пиломатеріалів з вільхи, що перевірені на адекватність за однорідністю середніх значень поточної вологості за критерієм Ст'юдента та дисперсій розкиду поточної вологості за критерієм Фішера, які використані для прогнозування якості сушіння їх в камерах різних конструкцій.

5. Запропонований метод прогнозування якості сушіння пилопродукції з вільхи дає можливість оптимізувати параметри режиму.

### **Список літератури**

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности / Лыков А.В. – М. : Гостехиздат, 1952. – 392 с.
2. Пижурич А.А. Современные методы исследований технологических процессов в деревообработке / Пижурич А.А. – М. : Лесн. пром-сть, 1972. – 248 с.
3. Пінчевська О.О. Нормалізація оцінки якості сушіння / О.О. Пінчевська // Науковий вісник НАУ: зб. науково-технічних праць. – К., 2006. – Вип. 103. – С. 346–352.

4. Сажин Б.С. Гидромеханические и диффузионные процессы / Б.С. Сажин, Л.И. Гудим, В.А. Реутский. – М. : Легпромбытиздат, 1968 – 200 с.

5. Сажин Б.С. Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов / Б.С. Сажин, В.А. Реутский. – М. : Легпромбытиздат, 1990. – 224 с.

6. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Б.С.Сажин. – М. : Химия, 1984. – 320 с.

7. Феллер М.Н. О прогнозе качества сушки в конвективных лесосушилках / М.Н. Феллер, Е.А. Пинчевская // Оборудование и инструмент для профессионалов: спеціалізоване видання в царині деревооброблення і лісового господарства. – 2004. – № 1. – С. 54–55.

*Предложен метод расчета дисперсии конечной влажности пиломатериалов в современных камерах при условии описания процесса сушки стохастической моделью с изменчивыми начальными и граничными условиями. Представлено описание процесса сушки с учетом термовлагопроводности, на основании которого разработан адекватный метод расчета кинетики сушки. Расчетные и экспериментальные кривые кинетики сушки пиломатериалов из ольхи показали удовлетворительное совпадение, что позволяет прогнозировать их качество сушки в камерах разных конструкций.*

**Ключевые слова:** *пилопродукция, древесина ольхи, кинетика сушки, качество сушки, дисперсия конечной влажности.*

*Proposed method of calculation of the dispersion finish moisture content by description the wood drying process as probability model with the accidental initial and boundary conditions. The description of drying process with the register of thermo-moisture permeability and adequate calculated method of drying kinetic are proposed. Calculation and experimental curved lines of current dispersion moisture content of alder saw timbers has satisfactory coincidence, so this method can be used for prognosis drying quality kiln dried alder saw timbers in different chambers.*

**Keywords:** *timber, alder, drying kinetic, the quality of drying, the dispersion finish moisture content.*