

УДК 631.3. 631.171

## ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ ДЛЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА

*С.Г. Білик, кандидат технічних наук,*

*В.Я. Бунько, старший викладач,*

*А.П. Марисюк, старший викладач*

*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»*

*Проведено дослідження впливу надвисокої частоти активації зерна на інтенсифікацію його сушіння активним вентиляванням. Визначено вплив різних параметрів на величину коефіцієнта дифузії вологи, досліджено можливості використання термопар у полі НВЧ з визначенням температури в зоні дії НВЧ.*

***Надвисока частота, температура, термопара, НВЧ поле, процес сушіння, коефіцієнт дифузії, волога, теплота, агент сушіння, електромагнітне поле, термодинаміка, конвективне сушіння, парціальний тиск.***

Збільшення продуктивності продуктів землеробства являється основною задачею сільського господарства з метою задоволення потреб населення у продовольстві. Зберігання вирощеного врожаю досягається, в першу чергу, за допомогою сушарок, які являються єдиним надійним способом зупинення активних біохімічних процесів у живильних матеріалах і їх консервування. Низька продуктивність сушильних комплексів і недостатня забезпеченість їх призводять до того, що через несвоєчасне сушіння на зернотоках цілорічно втрачається значна кількість врожаю зерна.

На практиці сільськогосподарського виробництва використовують різні способи для інтенсифікації процесу сушіння зерна: використання електроактивованого повітря, попередній нагрів зерна, застосування рециркуляційних режимів, вакуумувальні зони сушіння, зміна газового складу сушильної камери і т.д. Серед них останнім часом все частіше використовується дія магнітним полем надвисокої частоти (НВЧ). У результаті розроблені установки, які дозволяють удосконалювати промислові установки, для застосування на сільськогосподарських підприємствах. Існуючі установки для НВЧ інтенсифікації застосовуються для сушіння в шахтних, конвеєрних сушарках, але практично не вивчено застосування НВЧ інтенсифікації для сушіння в бункерах активного вентилявання.

**Мета дослідження** – аналіз впливу електромагнітного поля надвисокої частоти активації зерна на інтенсифікацію його сушіння активним вентиляванням.

**Матеріали та методика досліджень.** Аналіз інтенсифікації процесу сушіння зерна активним вентиляванням з використанням електромагнітного

поля НВЧ, зниження великої потужності опромінюючих магнетронів, для запобігання перегріву зерна, нерівномірності нагріву, розтріскування матеріалу.

При експериментальних дослідженнях впливу електромагнітного НВЧ поля на матеріал необхідним є дослідження проходження зерна через активну зону, умов для рівномірної обробки зерна в НВЧ активній зоні апарату, стан зернового шару при сушінні. Зміну параметрів процесу сушіння матеріалу та агента сушіння визначали, використовуючи відомі залежності коефіцієнта дифузії від температури і тиску в газах, методи термодинаміки необоротних процесів, залежність масовіддачі від гідродинамічних, фізичних і геометричних факторів.

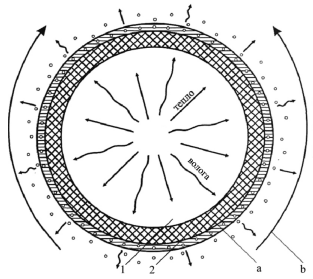
**Результати досліджень.** Метою використання зони НВЧ активації при активному вентиляванні являється: створення в зернівці градієнтів температури і вологості, направлених в один бік; створення градієнтів температур тиску вологи всередині зернівки, інтенсифікуючих вологознімання.

Спрощений механізм видалення вологи із зерна при високочастотному підводі енергії представлений наступним чином (рис.1). Діелектричний нагрів зерна, який володіє високою інтенсивністю, призводить до того, що всередині зерна виникає надлишковий (порівняно з атмосферним) тиск пари  $P_n$ . Створюваний градієнт температури являється рушійною силою переносу вологи із внутрішніх шарів до його поверхні. Величина градієнта тиску і, відповідно, швидкість переносу вологи залежать від параметрів електромагнітного поля НВЧ. При їх високих значеннях надлишковий тиск може зрости до такої степені, що виявиться більшим ніж опір структури зерна, і призведе до його руйнування. Таким чином, при сушінні зерна енергією електромагнітного поля НВЧ, внутрішній вологоперенос може бути суттєво (порівняно з умовами конвективного сушіння) інтенсифікований, проте до певної критичної величини, обмеженою умовою збереження структури зерна і його якості в цілому [1].

Волога, яка поступила із середини на поверхню зерна, випаровується в навколишнє середовище. Швидкість цього випаровування або внутрішнього вологопереносу буде визначатися не стільки параметрами електромагнітного поля надвисокої частоти, але і параметрами навколишнього середовища. Обов'язковою умовою видалення вологи з поверхні зерна, як і при конвективному сушінні – це наявність різниці між парціальним тиском пари на його поверхні  $P_3$  і в навколишньому середовищі  $P_6 (P_3 > P_6)$ . Але, якщо при конвективному сушінні температура навколишнього середовища (агента сушіння)  $\theta_6$  більша температура поверхні зерна  $\theta_3$  ( $\theta_6 > \theta_3$ ), то при високочастотному сушінні ця умова внутрішнього вологопереносу не являється суттєвою і  $\theta_6$  може бути меншою (тобто  $\theta_6 < \theta_3$ ) [3].

Отже, сушіння зерна енергією електромагнітного поля НВЧ, так як конвективним способом, характеризується сукупністю двох явищ – внутрішнього і зовнішнього вологопереносу. Проте, порівняно з конвективним, при НВЧ – сушінні зерна забезпечуються кращі умови внутрішнього вологопереносу, ніж зовнішнього, і процес сушіння лімітує зовнішній вологоперенос, швидкість якого визначається параметрами навколишнього

середовища (повітря) [1].



**Рис. 1. Механізм видалення вологи із зерна при високочастотному сушінні:**  
 1 – зерно; 2 – зона випаровування вологи, а -  $P_3, \Theta_3$ ; б-  $P_6, \Theta_6$ .  $P_3 > P_6, \Theta_3 > \Theta_6$

У технологічному колі активного вентилявання в НВЧ активній зоні із системи диференціальних рівнянь, які описують процес тепловологообміну при НВЧ обробітку, рівнянням можна знехтувати [2].

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} &= \alpha \cdot \nabla^2 \Theta + \frac{\varepsilon}{c \cdot \tau} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{Q_v}{c \cdot \rho_0}; \\ \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} &= \alpha_{m_2} \cdot \nabla^2 U + \alpha_{m_2} \cdot \delta_2 \cdot \nabla^2 \Theta + \varepsilon \frac{\partial \Theta}{\partial \tau}; \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} &= \alpha_p \cdot \nabla^2 P + \frac{\varepsilon}{c_v} \frac{\partial U}{\partial \tau}. \end{aligned} \quad (1)$$

У результаті, для НВЧ нагріву отримаємо:

З врахуванням того, що  $\frac{\partial u}{\partial \tau} \rightarrow 0$  маємо:

При зупиненні НВЧ впливу система рівнянь буде мати наступний вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \alpha \cdot \nabla^2 \Theta \\ \frac{\partial P}{\partial \tau} = \alpha_p \cdot \nabla^2 P \end{cases} \quad (2)$$

Із системи останніх рівнянь видно, що «рушійними» складовими процесу являються  $\nabla^2 \Theta$  і  $\nabla^2 P$  (*divgrad* температури і тиску) [1].

Складність розрахунку не тільки величини градієнта тиску, але і самого тиску рідини і пари в зернівці. Таким чином, доцільно розглянути зв'язок зміни тиску в зернівці зі зміною різниці температур  $\Theta_u - \Theta_n$ .

На рис.2 показані залежності  $(\Theta_u - \Theta_n) = f(\tau)$  при різних величинах питомої потужності НВЧ впливу. Із рисунку видно, що характер зміни залежності  $(\Theta_u - \Theta_n) = f(\tau)$  ідентичний характеру зміни залежності  $P = f(\tau)$ . Оцінимо їх ідентичність. Для цього необхідно порівняти графіки  $f(\tau)$  і  $if(\tau)$ .

Виконаємо необхідні перетворення.

$$\begin{aligned} \Delta \Theta = (\Theta_u - \Theta_n) &= \left( \Theta_0 + \frac{2 \cdot Q_v \cdot R^2}{\lambda \cdot \pi^2} \cdot (1 - e^{K_p \cdot \tau}) \right) - \left( \Theta_0 + 0,687 \cdot \frac{Q_v \cdot R^2 \cdot (e^{K_p \cdot \tau} - 1)}{\lambda \cdot \pi^2} \right), \\ \Delta \Theta &= 0,185 \cdot \frac{Q_v \cdot R^2 \cdot K_p \cdot (e^{K_p \cdot \tau} - 1)}{\lambda}. \end{aligned} \quad (3)$$

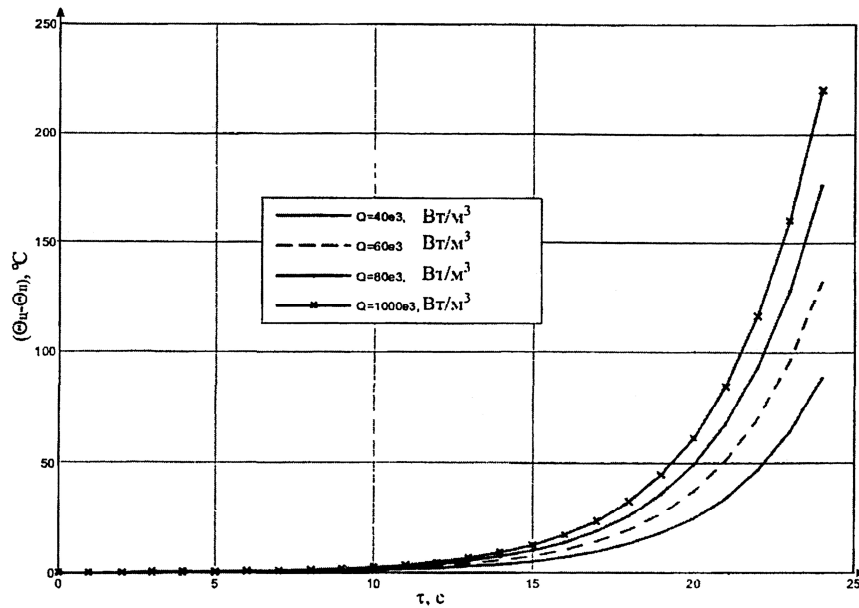


Рис. 2. Вплив питомої потужності джерела НВЧ випромінювання на динаміку різниці температур центру і поверхні зернівки

Вираз  $\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{2 \cdot (\Theta_u - \Theta_n) \cdot \lambda - Q_v \cdot R^2}{r \cdot \rho_s \cdot c_v \cdot R^2} - 3,176 \cdot \alpha_p \frac{P_u}{R^2}$ , який описує зміну  $\frac{\partial P}{\partial \tau}$  в явному виді не містить змінної  $\tau$ . Виконавши підстановку формули  $\alpha_p = 1,318132 \cdot \Delta t \cdot 10^3 - 1,57366 \cdot 10^2$  в останній вираз, отримаємо:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{2 \cdot (\Theta_u - \Theta_n) \cdot \lambda - Q_v \cdot R^2}{r \cdot \rho_s \cdot c_v \cdot R^2} - (4,1864 \cdot 10^3 \cdot \Delta t - 499,7757) \cdot \frac{P_u}{R^2} \quad (4)$$

Підставивши рівняння (3) в (4) і виконавши необхідні перетворення, запишемо остаточний вираз:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{Q_v \cdot K_p \cdot e^{\tau \cdot K_p} \cdot \left(0,361 - \frac{755,582s}{\lambda}\right) \cdot \tau}{r \cdot \rho_s \cdot c_v \cdot R^2} - \frac{\left(Q_v \cdot R^2 \cdot \left(e^{\tau \cdot K_p} - 1\right) \cdot \left(0,361 - \frac{755,582s}{\lambda}\right) - 1\right) - 499,775}{R^2} \cdot P_u \quad (5)$$

Продиференціювавши по  $\tau$  (3), отримаємо:

$$\frac{\partial \Delta \Theta}{\partial \tau} = 0,1805 \cdot \frac{Q_v \cdot R^2 \cdot K_p \cdot e^{\tau \cdot K_p}}{\tau} \quad (6)$$

На рис. 3 показані графіки залежностей  $\frac{d\Delta\theta}{d\tau} = f(\tau)$  і  $\frac{dP}{d\tau} = f(\tau)$ . Вони підтверджують взаємозв'язок зміни тиску рідини всередині зернівки від величини перепаду температур на її поверхні і в центрі. Причому, із виразу (4) видно, що ця залежність лінійна [4].

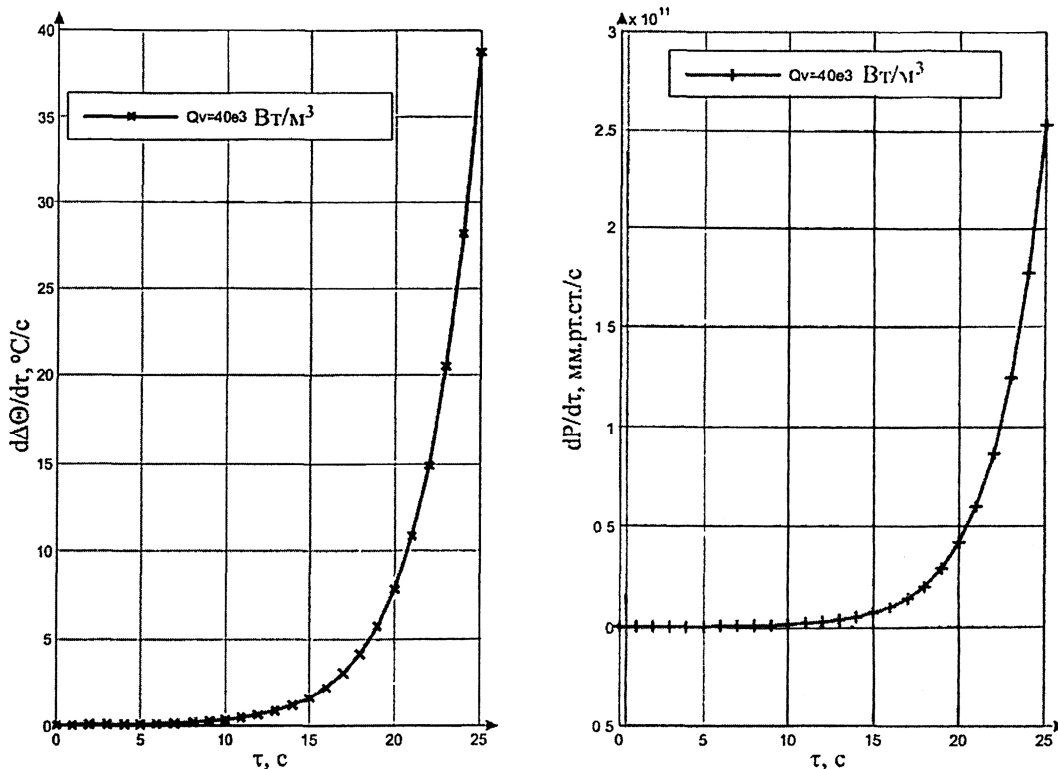
$$\frac{dP}{d\tau} = K_1 \cdot \Delta\theta - K_2 \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{2 \cdot \lambda}{r \cdot \rho_3 \cdot c_v \cdot R^2} - \frac{4,1864 \cdot 10^3 \cdot P_{\text{ц}}}{R^2}$$

$$K_2 = \frac{499,775 \cdot P_{\text{ц}}}{R^2} - \frac{Q_v}{r \cdot \rho_3 \cdot c_v}$$

де коефіцієнт кореляції для  $\frac{dP}{d\tau} \text{ і } \Delta\theta$  складає 0,999. Це означає, що для контролю закономірності тиску рідини в зернівці, при НВЧ обробі зернового шару, достатньо контролювати температуру зернівки в її центрі і на поверхні.

Слід відмітити, що коефіцієнт конвективного теплопереносу при релаксації тиску також змінить свою величину в певний період, тобто при зменшенні градієнта температур всередині зернівки зменшиться і градієнт тиску. Встановлено, що швидкості їх зміни різні. Причому, швидкість зміни тиску більша швидкості зміни градієнта температур. У цьому випадку не можна говорити про лінійний взаємозв'язок  $\frac{dP}{d\tau} \text{ і } \Delta\theta$  [4].



**Рис. 3. Взаємозв'язок швидкості зміни різниці температур і тиску парів в зернівці**

Скористуємось методом вирішення рівності теплопровідності  $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot \theta$  для отримання залежностей, які нас цікавлять [5].

Особливість задачі полягає в тому, що центр зернівки являється джерелом тепла. Його температура вища температури зовнішніх шарів зернівки. Після припинення НВЧ впливу, центр зернівки починає

оохолоджуватись, а поверхня навіть дещо підвищує температуру. Після вирівнювання температур по всьому об'єму зернівки вона починає зменшуватись. Процес охолодження зернівки може бути розділений на три етапи:  $\theta_{\text{ц}} - \theta_n > 0$ ;  $\theta_{\text{ц}} - \theta_n = 0$ ;  $\theta_{\text{ц}} - \theta_n < 0$ . Оскільки в даному випадку цікавим є зв'язок  $\Delta\theta$  з  $\Delta P$  після припинення впливу НВЧ, то розглянемо залежність  $\Delta\theta = f(\tau)$ . Вирішення рівняння теплопровідності  $\frac{d\Delta\theta}{dt} = \alpha \cdot \nabla^2 \cdot \theta$  передбачає значення початкових і граничних умов [3].

Із робіт [1] випливає, що в початковий момент часу після призупинення впливу НВЧ випромінювання, розподіл температури в зернівці можна описати параболою, симетричною відносно центру. Для  $\Delta\theta$  це буде виглядати наступним чином:

$$\Delta\theta(x, 0) = f(x) = \frac{K \cdot (\theta_{\text{ц}} - \theta_n) \cdot x^2}{R^2} = \frac{K \cdot \Delta\theta_0 \cdot x^2}{R^2}$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності.

Оскільки в НВЧ активній зоні зерно знаходиться в щільному, малорухомому шарі, то в міжзерновому просторі, який не продувається атмосферним повітрям, достатньо швидко встановлюється стан гігromетричної рівноваги [4].

$$\theta(+R, \tau) = \theta(-R, \tau)$$

Рівняння теплопровідності, з врахуванням обмежень і початкових умов має вигляд:

$$\Delta\theta(x, \tau) = \text{Cos}\left(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot R}\right) \cdot e^{-\tau \cdot \frac{\alpha \cdot \pi^2}{R^2 \cdot 4}} \cdot \frac{2}{R} \cdot \int_0^R \frac{K \cdot \Delta\theta_0 \cdot x^2}{R^2} \cdot \text{Cos}\left(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot R}\right) \cdot dx$$

де  $\Delta\theta_0$  – різниця  $(\theta_{\text{ц}} - \theta_n)$  після припинення впливу НВЧ поля.

Проінтегрувавши рівняння, отримаємо:

$$\Delta\theta(x, \tau) = 0,141 \cdot \Delta\theta_0 \cdot K \cdot e^{-\tau \cdot \frac{\alpha \cdot \pi^2}{R^2 \cdot 4}} \cdot \text{Cos}\left(\frac{\pi \cdot x}{2 \cdot R}\right)$$

Для співвідношення  $\frac{x}{R} = 1$  ( $\Delta\theta$  по всій довжині зернівки) [1]

$$\Delta\theta = \Delta\theta_0 \cdot e^{-\tau \cdot \frac{\alpha \cdot \pi^2}{R^2 \cdot 4}} \quad (8)$$

Використавши раніше отримані результати розрахунків для  $\theta_{\text{ц}}$  і  $\theta_n$  при НВЧ нагріві зерна, розрахуємо зміну  $\Delta\theta$  після зняття НВЧ впливу. Щоб визначити взаємозв'язок  $\Delta\theta$  і  $P_{\text{рел}} = f(t)$  або . Розрахуємо коефіцієнти кореляції даних функцій. Для  $\Delta\theta$  і  $P_{\text{рел}}$  коефіцієнт кореляції рівний 0,717. Розіб'ємо криві релаксації тиску і  $\Delta\theta = f(\tau)$  на часові відрізки і знайдемо для них величину коефіцієнта кореляції [1].

Для часового інтервалу в 5с коефіцієнт кореляції  $K_{\Delta\theta P_{\text{рел}}} = 0,956$ . Для 10с  $K_{\Delta\theta P_{\text{рел}}} = 0,885$ .

### Висновки

Отримані дані результати дозволяють говорити, що в початковий момент часу (5–10 с) після припинення впливу НВЧ поля на зерновий шар при зміні різниці температур між поверхнею зернівки і її центром можна судити про релаксацію тиску парів у зернівці. Величина коефіцієнта конвективного теплообміну при НВЧ нагріві значно відрізняється від величини цього коефіцієнта при релаксації тиску, що необхідно враховувати при розрахунках. Швидкість зміни тиску в зернівці при НВЧ нагріві має лінійний характер (з коефіцієнтом кореляції 0,999) з динамікою різниці температур центру і поверхні зернівки, що дозволяє контролювати процес зміни тиску в зернівці за різницею температур.

Достатньо високий коефіцієнт кореляції (0,956-0,885) дозволяє судити про релаксацію тиску в зернівці тільки протягом 10 с після призупинення впливу НВЧ поля. У НВЧ активній зоні, яка використовується в технологічному процесі активного вентилявання, доцільно використовувати декілька магнетронів невеликої потужності, рівномірно розподілених на поверхні.

### Список літератури

1. Будников Д.А. Интенсификация сушки зерна активным вентилярованием с использованием электромагнитного поля СВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Будников Д.А. – З., – 2008. – С. 52-59.
2. Беляев А.А. Исследование распределения СВЧ поля в пространстве рабочей камеры [Текст] / А.А. Беляев, А.Л. Андержанов, С.А. Андреев, А.И. Соколов // Электропривод и электротехнология на объектах АПК: сб. науч. тр. / МИСПП имени В.П. Горячкина. – М., 1989. – С. 12-20.
3. Билько М.И. Измерение мощности на СВЧ [Текст] / М.И. Билько, А.К. Томашевский. – 2-е изд. Перераб. И доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 168с.
4. Бородин И.Ф. Изменение всхоженности семян зерновых культур под влиянием СВЧ-обработки [Текст] / И.Ф. Бородин, С.В. Вендин, А.Д. Горин // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 1993. – №2. – С. 92-95.
5. Бородин И.Ф. Применение СВЧ-энергии в сельском хозяйстве [Текст] / И.Ф. Бородин, Г.А. Шарков, А.Д. горин. – М.: ВНИИТЭИагропром, 1987. – 56с.

*Проведено исследование влияния сверхвысокой частоты активации зерна на интенсификацию его сушки активным вентилярованием. Определено влияние различных параметров на величину коэффициента диффузии влаги, проведено эксперимент по определению возможности использования термопар в поле СВЧ, определено температуру в зоне действия СВЧ с помощью термопар.*

**Сверхвысокая частота, температура, термонара, СВЧ поле, процесс сушки, коэффициент диффузии, влага, теплота, агент сушки, электромагнитное поле, термодинамика, конвективная сушка, парциальное давление.**

*The effect of ultra-high frequency activation of grain to intensification of its drying by active ventilation is investigated. The influence of various parameters on the moisture diffusion coefficient is determined. Experimental investigations of the use of thermocouple in the microwave field are done to determine the temperature in the area of microwave with thermocouple.*

**Ultra-high frequency, temperature, thermocouple, the microwave field, the drying process, the diffusion coefficient, moisture, heat, drying agent, the electromagnetic field, thermodynamics, convective drying, the partial pressure.**