

Сушіння зерна в активних гідродинамічних режимах з урахуванням шаруватості його структури

Богдана Гайвась¹, Вероніка Дмитрук², Анатолій Дмитрук³

¹ д. т. н., с. н. с., Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дудасва, 15, Львів, 79005, e-mail: haj@cmm.lviv.ua.

² к. т. н., Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дудасва, 15, Львів, 79005; Національний університет «Львівська політехніка», вул. С.Бандери, 12, e-mail: dmytruk15@gmail.com

³ Львівський національний університет ім.І.Франка, вул. Університетська, 1, Львів, 79000, e-mail: dmytruk.anatoliy@gmail.com

Розглянуто особливості моделювання активних гідродинамічних режимів сушіння зерна, проаналізовано підходи, які найчастіше застосовуються в інженерній практиці. На основі фундаментальних розв'язків моделі теплопровідності та механодифузії в зерні та міжзерновому шарі досліджено особливості сушіння зерна в активних гідродинамічних режимах з урахуванням двошарової структури окремої зернівки. Проведено числове дослідження розподілів температури та концентрації вологи в структурних елементах зернівки, яке виявило рекомендовані значення основних параметрів процесу сушіння, а саме, температури, швидкості потоку сушильного агента для досягнення рівномірного осушення партії зерна пшениці.

Ключові слова: сушіння, активний гідродинамічний режим, ідеальне витіснення, волога, температура, неоднорідна структура, пшениця.

Вступ. Сушка — один з найбільш енергоємних процесів. З метою економії вартісних енергоресурсів сучасні апарати сушіння повинні задовольняти ряд високотехнологічних вимог за мінімуму видатків. Для таких апаратів необхідно створювати відповідне програмне забезпечення комплексного аналізу вологих матеріалів та алгоритми дій відповідно до встановлених характеристик об'єктів сушіння [1]. Комп'ютерне моделювання тепломасопереносу в процесі сушіння дисперсних систем є специфічним для кожного виду апарату сушіння, так як пов'язане з різними методами математичного моделювання роботи сушильних установок з різною взаємодією потоку частинок і агента сушіння (імпульсного, псевдозрідженого, сушка в гідродинамічних активних режимах і т.д.).

В даній статті розглядається процес сушіння партії зерна пшениці сорту ОД-16 у вертикальностінних апаратах з активними гідродинамічними режимами. Основною характеристикою таких апаратів є перебування матеріалу сушіння в газозваженому стані. Швидкість розріджувального середовища (потік розріджувального агента) приймається відомою і сталою v_z . При малих значеннях v_z —

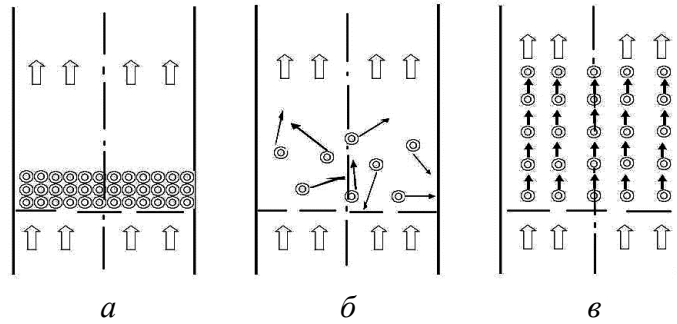


Рис. 1. Три режими
активного гідродинамічного сушіння

зернистий шар залишається нерухомим (рис. 1а). За перевищення деякого критичного значення швидкості продування нерухомість шару зерна порушується (змінюється його пористість та висота), шар стає текучим і переходить у газозважений (псевдорозріджений) стан. В такому шарі тверді частинки інтенсивно переміщуються в потоці у різних напрямках (рис. 1б), але шар залишається з чітко визначеною верхньою межею розділу в потоці газу, який пройшов через шар наскрізь. За подальшого збільшення швидкості розріджувального агента пористість шару продовжує збільшуватися і його висота продовжує зростати аж до того моменту, коли зерно починає відносити (рис. 1в) [2].

1. Математичне моделювання режимів активного гідродинамічного сушіння

Гідродинаміка сушильного апарату має суттєвий вплив на процес сушіння, особливо в апаратах із газозваженим станом матеріалу, в яких вона визначає тривалість перебування вологого матеріалу в апараті. Вивчення таких режимів викликає значний інтерес, оскільки у газозваженому стані можна успішно висушити практично усі види матеріалів. Для використання гідродинамічних режимів необхідно забезпечити виконання двох умов [3]: щоб тривалість перебування матеріалу в апараті, яку можна забезпечити для певного гідродинамічного режиму газозваженого шару, відповідав потрібному часу сушіння, який впливає з умов кінетики сушіння та технологічних вимог залишкової вологи. І по-друге, для отримання висушеного продукту необхідної якості потрібно, щоб час перебування окремих частинок матеріалу в апараті не був довгим, інакше, в готовому продукті будуть як недосушені так і пересушені частинки (пересушення може призвести до термічного розкладу частини матеріалу та до інших негативних наслідків). Це досягається за режимів, близьких до режимів ідеального витіснення за твердою фазою [4]. Дуже часто під активними гідродинамічними режимами помилково розуміють режими, які характеризуються підвищеною швидкістю руху фаз, особливо газової, і не зважають на отриманий технологічний ефект.

Ознакою справжнього активного гідродинамічного режиму є розвинута поверхня взаємодії фаз, гідродинамічна стійкість (стабільність гідродинамічної обстановки в часі по всьому об'єму апарату), наближення гідродинамічної моделі потоків в апараті до моделі ідеального витіснення, збільшення відносної швидкості руху фаз, зниження енергоємності процесу [3]. Збільшення ефективності пов'язане зі збільшенням міжфазних відносних швидкостей (але до певної міри), рухомості і зіткнення частинок, збільшення середнього коефіцієнта тепловіддачі.

Найважливішим моментом математичного моделювання процесу сушки в активних гідродинамічних режимах є моделювання гідродинаміки газозваженого шару. Серед підходів, які застосовують в інженерній практиці для моделювання гідродинаміки, можна виділити два основних: опис рухомої системи частинок з врахуванням їх взаємодії та апроксимація типовими чи комбінованими моделями [5-8].

Наприклад, реальним потокам в проточних апаратах з мішалкою, в яких висота мало відрізняється від діаметра, найкраще відповідає модель ідеального змішування [6]. Коли модель складається з n послідовно з'єднаних комірок ідеального змішування, тоді застосовується комірчата модель [5]. Трубочасті апарати з великою різницею довжини трубок до їх діаметра при турбулентному русі рідини або газу можуть описуватися як моделі ідеального витіснення [8]. Технологічні розрахунки в рамках одно- та двопараметричних дифузійних моделей дають можливість досить точно відтворювати властивості реального потоку при дослідженні багатьох апаратів, зокрема, плівкових, розпилювальних, барботажних, пульсаційних, роторно-дискових екстракторів, а також трубчастих апаратів [9].

2. Модель теплопровідності та механодифузії в зерні та міжзерновому шарі

Типові моделі ідеального перемішування, ідеального витіснення, дифузійні моделі з певним рівнем точності можуть застосовуватися для відтворення структури і гідродинамічних властивостей потоків у різних апаратах хімічної промисловості. Експериментально встановлено, що при дослідженні масопереносу та теплопровідності зерна в процесі сушіння необхідно враховувати неоднорідність структури зернини, глибину розміщення її в шарі та основні характеристики зерна та пористого шару [10].

Вивчається модель активного гідродинамічного сушіння шару зерна завтовшки L , який складено з однакових вологих зернин радіуса R (рис. 2). Шар розглядається в декартовій системі координат, так що вісь Oz є перпендикулярною до його поверхонь. Усереднені за радіусом кульки шару продуваються потоком розріджуючого агента зі швидкістю v_z , при якому вони перебувають у газозваженому стані. Приймається гіпотеза ідеального витіснення, коли потік ідеалізується і рух газоподібного середовища представляється у вигляді поршневого при повній відсутності перемішування вздовж потоку.

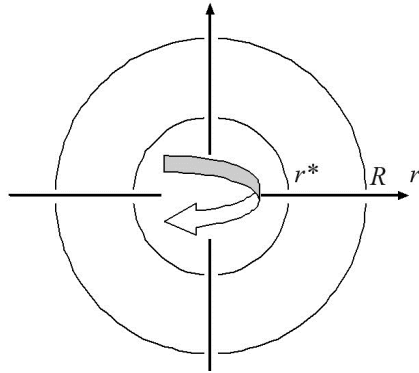


Рис. 2. Двошарова структура зернини пшениці

Основне співвідношення для моделі ідеального витіснення витікає з умови неперервного потоку $v_z = const$. Коефіцієнт $\tilde{\alpha}$ тертя сушильного агента з зерном відомий і сталий. В сушарнях коридорного типу на вході враховано збурення за концентрацією та температурою A_C , A_T , відповідно. Сушильний агент подається або з однієї, або з двох камер з різною періодичністю нагріву та охолодження Ω_{iT} .

Кожна зернина розглядається як двошарова (ядро та оболонка) куля еквівалентного об'єму, яку віднесено до сферичної системи координат з початком у її центрі ($r = 0$) (рис. 2). Межа неоднорідності — межа розділу ядра (область 1) та оболонки (область 2) зернини $r = r^*$. Початкові температури міжзернового середовища та i -ї області зернини (надалі ці області позначатимуться верхніми індексами в дужках) T_{z0} , $T_{r0}^{(i)}$ відповідно.

Процес осушення кулі відбувається через її зовнішню поверхню контакту $r = R$ з міжзерновим середовищем. Концентрація вологи c_z у місці знаходження z вибраної кульки за товщиною шару визначається з розв'язку системи взаємозв'язаних рівнянь механодифузії [11] та теплопровідності зернини і міжзернового шару [12]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 u_r^{(i)})}{\partial r} \right] - \xi^{(i)} \beta^{(i)} \frac{\partial c^{(i)}}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial (rc^{(i)})}{\partial \tau} = D^{(i)} \frac{\partial^2 (rc^{(i)})}{\partial r^2} - D_\varepsilon^{(i)} \frac{\partial^2 (r\varepsilon^{(i)})}{\partial r^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (rT^{(i)})}{\partial \tau} = a_r^{(i)} \Delta (rT^{(i)}), \quad (i = 1; 2), \quad (2)$$

де $\xi^{(i)} = 3K^{(i)} / (3K^{(i)} + 4G^{(i)})$ — механічна стала, $\varepsilon^{(i)} = \partial u_r^{(i)} / \partial r + 2u_r^{(i)} / r$ — об'ємна деформація, z — координата за товщиною шару, $c^{(i)}$ — концентрація вологи, τ — час, $u_r^{(i)}$ — радіальні переміщення, $\beta^{(i)}$ — концентраційний коефіцієнт об'ємного розширення, $K^{(i)}$ — модуль всестороннього об'ємного стиску, $G^{(i)}$ —

модуль зсуву, $D^{(i)}$ — коефіцієнт дифузії, $D_{\varepsilon}^{(i)}$ — коефіцієнт впливу градієнта поля об'ємної деформації на масовий потік вологи за рахунок колоїдності матеріалу зерна, $a_T^{(i)}$ — коефіцієнт температуропровідності в i -ій області зернини.

При осушенні шару зерна розрізняється тепломасоперенос в зернині і в середовищі, що її оточує. Рівняння дифузії в міжзерновому середовищі за структурою аналогічне рівнянню конвективної теплопровідності:

$$\frac{\partial c_z}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial c_z}{\partial z} = D_z \frac{\partial^2 c_z}{\partial z^2} + J_r(r, z, \tau), \quad \frac{\partial T_z}{\partial \tau} + v_z \frac{\partial T_z}{\partial z} = a_{Tz} \frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2} + J_{rT}(r, z, \tau), \quad (3)$$

де $a_{Tz} = \lambda_z / c_{pz} \rho_z$ — температуропровідність міжзернового середовища, λ_z — коефіцієнт теплопровідності в міжзерновому середовищі, c_{pz} — теплоємність, ρ_z — густина, D_z — коефіцієнт дифузії пароповітряної суміші міжзернового середовища, $J_r(r, z, \tau)$, $J_{rT}(r, z, \tau)$ — інтенсивності локального джерела вологи та тепла в результаті випаровування з окремих зернин.

У початковий момент часу ($\tau = 0$) задаються переміщення $u_r = 0$ та концентрації вологи $c = c_0 = const$.

На зовнішній поверхні зернини $r = R$ дифузійний потік пропорційний до різниці концентрацій вологи на поверхні зернини і міжзернового середовища c_z :

$$-\tilde{D}^{(2)} \partial c^{(2)} / \partial r \Big|_{r=R} = k(c^{(2)} \Big|_{r=R} - c_z), \quad \tilde{D}^{(i)} = D^{(i)} - \xi^{(i)} \beta^{(i)} D_{\varepsilon}^{(i)}, \quad (4)$$

де k — коефіцієнт масовіддачі. На межі контакту області 1 та області 2 зернини $r = r^*$ справджується рівність потоків пароповітряної суміші при випаровуванні:

$$\left(D^{(1)} \frac{\partial \vartheta^{(1)}}{\partial r} + D_{\varepsilon}^{(1)} \frac{\partial \varepsilon^{(1)}}{\partial r} \right)_{r=r^*} = \left(D^{(2)} \frac{\partial \vartheta^{(2)}}{\partial r} + D_{\varepsilon}^{(2)} \frac{\partial \varepsilon^{(2)}}{\partial r} \right)_{r=r^*}. \quad (5)$$

Тут $\vartheta^{(i)}(r, \bar{z}, \tau) = c_r^{(i)}(r, \bar{z}, \tau) - c_{z0}(\bar{z}, 0)$, $c_{z0}(\bar{z}, 0)$ — початкове значення в міжзерновому середовищі шару, $\varepsilon = \varepsilon_{\alpha}^{\alpha}$ — перший інваріант тензора деформації. Задовольняючи граничні умови на поверхні зернини розв'язок для $\vartheta^{(2)}$ шукаємо у вигляді $\vartheta^{(2)} = \vartheta_1^{(2)} + c_2^{(2)}$, де $\vartheta_1^{(2)}$ задовольняє початковим та граничним умовам на границі областей 1 і 2, а $c_2^{(2)}$ вибирається так, щоб сумарно задовольнились умови конвективного нестационарного тепломасообміну на поверхні зернини (4) при імпульсному осушенні шару зерна.

Фундаментальні розв'язки зв'язаної задачі тепло- та вологопереносу в областях ядра та шкірки зернини отримані в [13]:

$$T^{(i)}(r) - T_{z0} = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{\infty} e^{-\mu_j^2 \tau} \left[(A_{1j}^{(i)} + A_{2j}^{(i)}) \cos(\lambda_{jT}^{(i)} r) + (B_{1j}^{(i)} + B_{2j}^{(i)}) \sin(\lambda_{jT}^{(i)} r) \right], \quad (6)$$

$$c^{(i)}(r) - c_{z0} = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{\infty} e^{-\mu_j^2 \tau} \left[(A_{1j}^{(i)} + A_{2j}^{(i)}) \cos(\lambda_j^{(i)} r) + (B_{1j}^{(i)} + B_{2j}^{(i)}) \sin(\lambda_j^{(i)} r) \right], \quad (7)$$

де $A_{1jT}^{(i)}$, $A_{2jT}^{(i)}$, $B_{1jT}^{(i)}$, $B_{2jT}^{(i)}$, $A_{1j}^{(i)}$, $A_{2j}^{(i)}$, $B_{1j}^{(i)}$, $B_{2j}^{(i)}$ — коефіцієнти залежності температури та концентрації вологи за товщиною зернини від збурень температури та концентрації вологи зовнішнього середовища в залежності від часу [8], швидкості продування та від висоти розміщення зернини [13].

2. Числовий аналіз розподілів температури у структурі зернини

Дослідження впливу температури на сушіння з метою оптимізації параметрів керування процесом проводилося на основі формули (6) для шару зерна пшениці ОД-16. Обчислення виконувались з точністю 10^{-7} . Приймались наступні базові значення параметрів: товщина шару зерна $L=1$ м, середній радіус зернівки $R=2.00086 \cdot 10^{-3}$ м, межа неоднорідності між ядром та оболонкою $r_*=0.85 R$. На основі праць [10, 14, 15] для такого матеріалу: коефіцієнт теплоємності $c_p=0.5$ ккал/(кг °К), коефіцієнти теплопровідності $\lambda_z=0.16$ Вт/(м °К), $\lambda^{(2)}=0.2$ Вт/(м °К), температуропровідності $a_{Tz}=4.64253 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $\tilde{a}_T^{(2)}=4.17827 \cdot 10^{-5}$ м²/с в міжзерновій області та в оболонці зернини відповідно. Температура та концентрація вологи у початковий момент часу $T_{z0}=291^\circ\text{K}$, $c_0=5 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, концентрація насиченої пари $c_z^n=1.34 \cdot 10^{-2}$ кг/м³, швидкість продування $v_z=1.5$ м/с, коефіцієнт тертя сушильного агента з зерном $\tilde{\alpha}=2.5$, амплітуди збурень температури $A_{T1}=5$, $A_{T2}=5$, циклічність нагріву та охолодження $\Omega_{iT}=8\pi/\tau_p$, повний час сушіння $\tau_p=5$ год.

На рис. 3-5 показані 3D розподіли температури в структурних елементах зернівки, враховуючи її двошарову будову. На рис. 3 подані зміни температури, коли зерно сушиться при 1-ому режимі активного гідродинамічного сушіння потоком сушильного агента температури 291°K . Збурення температури відсутні. Подача сушильного агента здійснюється з однієї камери.

Від початку процесу сушіння спостерігається падіння загальної температури зерна, яка сумарно за чотири години сушіння знижується на 3 градуса. Треба зауважити, що температура змінюється за товщиною зернини по різному. Так, оболонка зерна має температуру в середньому на пів градуса нижчу, ніж температура ядра (рис. 3,б).

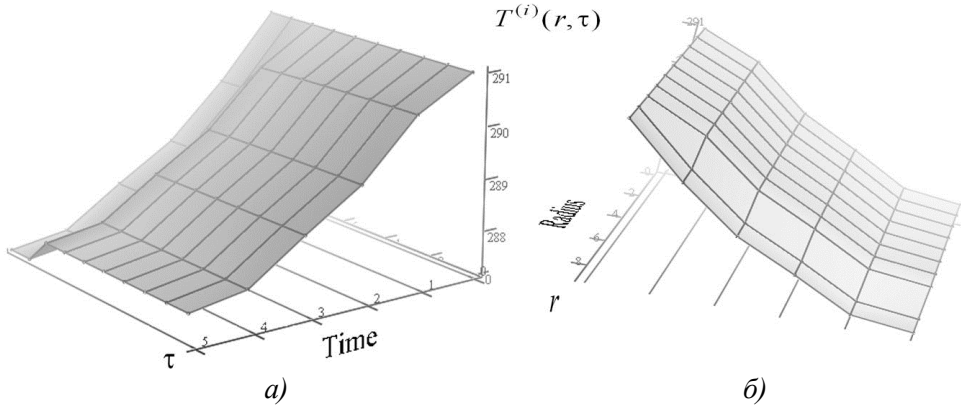


Рис. 3. 3D розподіли температури $T^{(i)}(r)$ в часі τ (рис.а) та за безрозмірним радіусом зернини \bar{r} (рис.б) для значення безрозмірної координати за товщиною шару $\bar{z}=0.5$.
Значення $\tau_1=0$, $\tau_2=1$, $\tau_3=2$, $\tau_4=3$, $\tau_5=4$, $\tau_6=5$ год відповідно.
Продування здійснюється повітрям температури 291°K . $A_{T_1}=A_{T_2}=0$.

На рис. 4 подані зміни температури, коли зерно сушиться при 2-ому режимі активного гідродинамічного сушіння потоком сушильного агента температури 296°K , потік направляєтся з однієї камери.

Отримані результати показали, що зерно швидко нагрівається за рахунок тепла сушильного агента. Проте зміна температури в різних частинах зернини відбувається неоднаково. В оболонці температура більша, ніж в ядрі зернини. Тому при сушінні зерна агентами імпульсного режиму необхідно слідкувати, щоб температура сушіння не перевищувала дозволених значення, оскільки виникає загроза загартування оболонок зернівки.

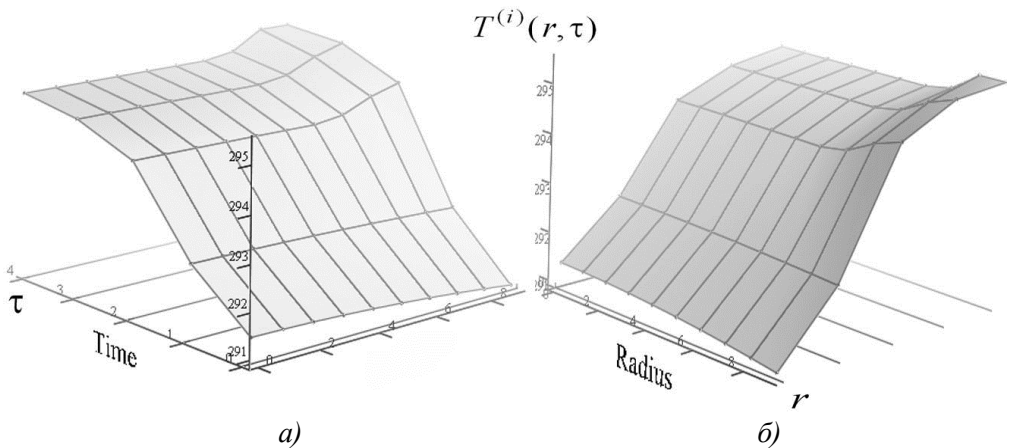


Рис. 4. 3D розподіли температури $T^{(i)}(r)$ в часі τ (рис.а) та за безрозмірним радіусом зернини \bar{r} (рис.б). Значення $\tau=0, 1, 2, 3, 4, 5$ год відповідно.
Збурення температури $A_{T_1}=5$, $A_{T_2}=0$. $\Omega_{iT}=4\pi/\tau_p$.

Основною ознакою загартування оболонки зернини є втрата нею здатності пропускати вологу [5]. Оболонка з алейроновим шаром стає мало пропускною і спричиняє здуття зерна. Тому зерно залишається сирым.

На рис. 5 подані розподіли температури, коли зерно сушиться при 3-ому режимі активного гідродинамічного сушіння потоком сушильного агента температури 296°K, потік направляється з двох камер. Циклічність нагріву та охолодження $\Omega_{iT} = 4 \pi / \tau_p$ на рисунках 5а,б та $\Omega_{iT} = 8 \pi / \tau_p$ на рисунках 5в,г.

Представлені на рис. 5 графіки показують, що зерно при надходженні гарячого повітря з двох камер нагрівається до потрібного значення вже за першу годину. Так само, як і в попередніх випадках, температура в різних частинах зернини неоднакова. Оболонка нагрівається більше, ніж ядро зернини. Тому при

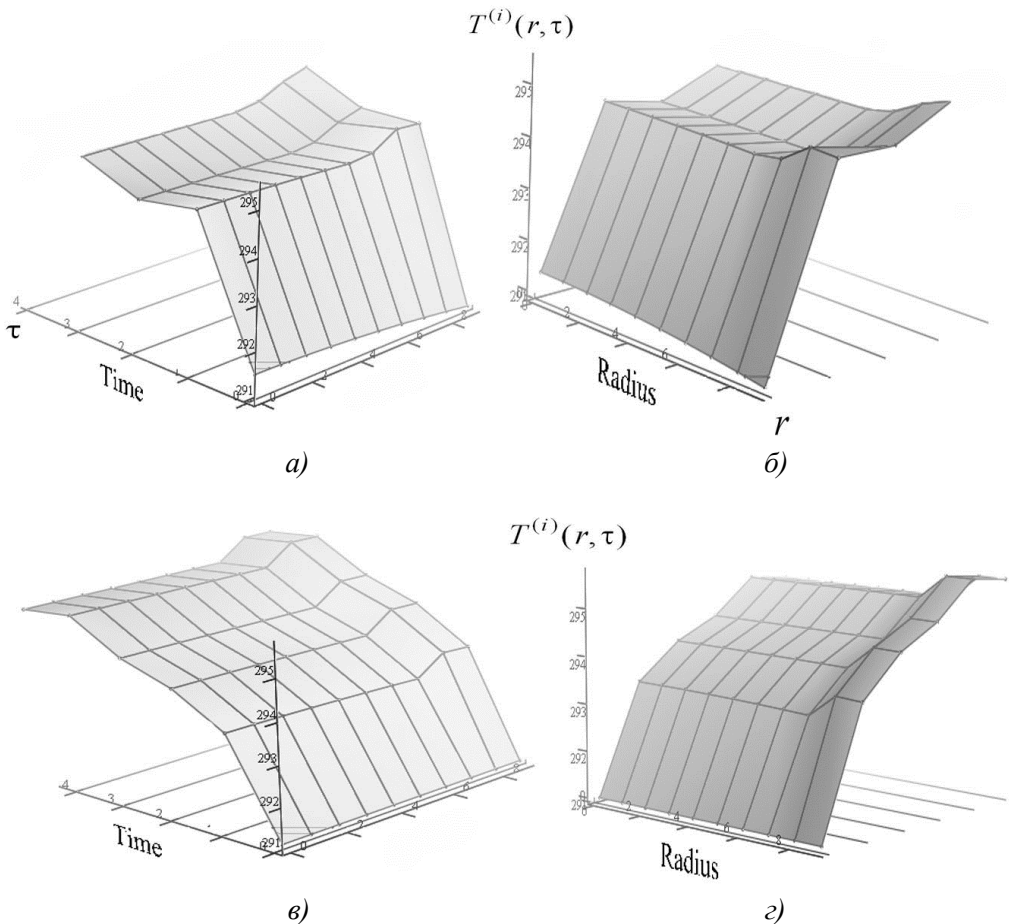


Рис. 5. 3D розподіли температури $T^{(i)}(r)$ в часі τ (рис.а) та за безрозмірним радіусом зернини \bar{r} (рис.б). Значення $\tau = 0, 1, 2, 3, 4$ год відповідно. Збурення температури $A_{T1} = 5, A_{T2} = 5$. Циклічність нагріву та охолодження $\Omega_{iT} = 4 \pi / \tau_p$ (рис.а,б), $\Omega_{iT} = 8 \pi / \tau_p$ (рис.в,г)

сушінні великих об'ємів зерна нагрітими агентами імпульсного режиму необхідно проводити перерви між етапами сушіння для перерозподілу вологи з внутрішніх частин зернівки до поверхні.

Як бачимо з рисунків, збільшення частоти нагріву та охолодження під час сушіння призводить до більш рівномірного прогрівання зерна (рис. 5в,г), що сприяє збереженню шкірки зернівки неушкодженою.

3. Числовий аналіз розподілів концентрації вологи у зернині під час сушіння

На основі отриманих фундаментальних розв'язків задачі теплопереносу отримано фундаментальні розв'язки задачі вологопереносу як для області ядра, так і для шкірки зернини (7). Проведено числовий аналіз розподілів концентрації вологи в окремій зернині на прикладі сушіння зерна пшениці ОД-16 в активних гідродинамічних режимах. Взято базові параметри задачі (див. п. 2). Досліджувався вплив основних параметрів задачі на розподіли концентрації вологи.

На рис. 6 продемонстровано розподіли концентрації вологи в зернині залежно від положення зернівки в загальному шарі, тобто від безрозмірної координати зернини \bar{z} . Проведений числовий аналіз показав, що положення зернини в шарі \bar{z} суттєво впливає на розподіли концентрації вологи в зернині у випадку 1-го режиму активного гідродинамічного сушіння, коли зернистий шар залишається нерухомим, або на початку 2-го режиму сушіння, коли він тільки набуває текучості і переходить у зважений стан.

На тривалість сушіння зерна також впливає величина швидкості продування v_z . При малій швидкості газового потоку зерно розташовується на решітці нерухомим шаром, зі зростанням швидкості газового потоку сила тертя сушильного агента з зерном збільшується, а тиск зерен на решітку, відповідно, зменшується. На рис. 7 зображені розподіли концентрації вологи у зерні залежно

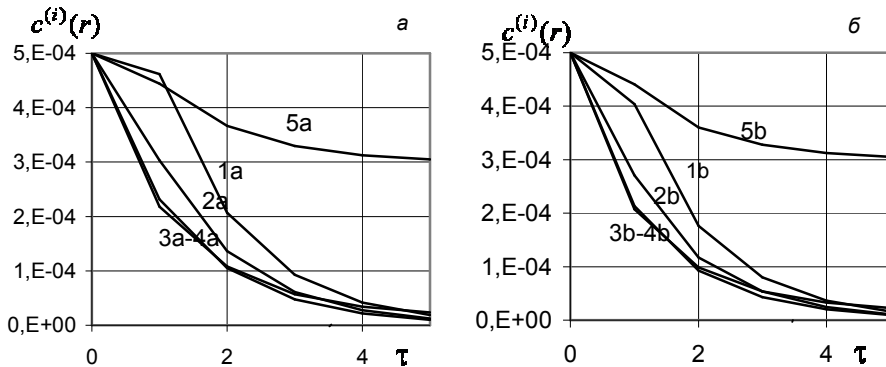


Рис. 6. Розподіли концентрації вологи в зернині $c^{(i)}(r)$ за безрозмірним радіусом зернини \bar{r} в часі τ залежно від значення безрозмірної координати зернини \bar{z} , $\bar{r}=0.1$ (рис.а), $\bar{r}=0.9$ (рис.б)
Криві 1, 2, 3, 4, 5 відповідають значенням $\bar{z}=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$ відповідно, $t=296^\circ\text{K}$

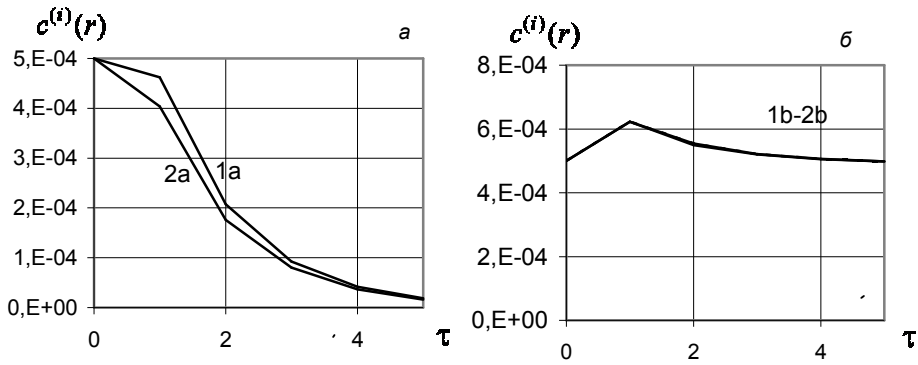


Рис. 7. Розподіли концентрації вологи в зернині $c^{(i)}(r)$ в часі τ залежно від швидкості продування v_z : $v_z=1,5$ м/с (рис.а), $v_z=1$ м/с (рис.б), криві 1а-1б для $\bar{r}=0,1$, 2а-2б – для $\bar{r}=0,9$, $t=296^\circ\text{K}$ значення безрозмірної координати зернини $\bar{z}=0,9$ (рис.б)

від швидкості продування.

На рис. 7б відтворено процес запарювання зерна. Через малу швидкість продування і, відповідно, недостатню подачу сушильного агента, на поверхні зернини конденсується багато раніше випареної вологи з виділенням теплоти. Ситуацію можна виправити, збільшивши швидкість продування та температуру сушильного агента (рис. 7а).

Треба зазначити, що після перевищення деякого критичного значення швидкості продування, яке в кожному конкретному випадку залежить від сукупності усіх технологічних параметрів процесу, спостерігається розрідження шару матеріалу сушіння.

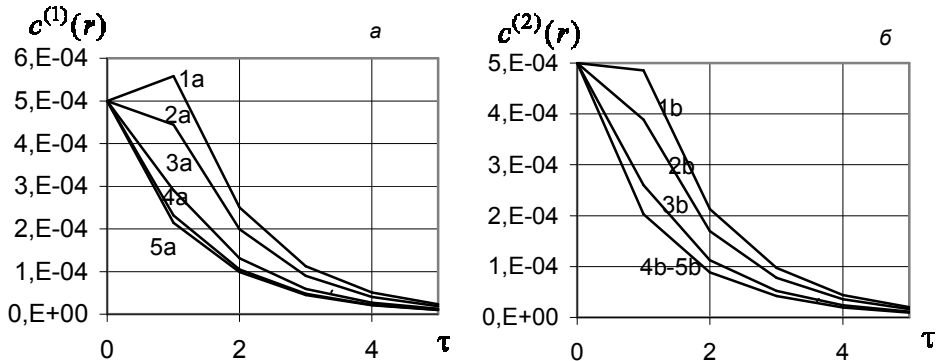


Рис. 8. Розподіли концентрації вологи в зернині $c^{(i)}(r)$ в часі τ залежно від значення коефіцієнта тертя $\tilde{\alpha}$ та безрозмірного радіуса зернини \bar{r} : $\bar{r}=0,1$ (рис.а), $\bar{r}=0,9$ (рис.б).

Криві 1, 2, 3, 4, 5 відповідають значенням $\tilde{\alpha}=0,1, 0,5, 1,5, 2,5, 3,5$ відповідно

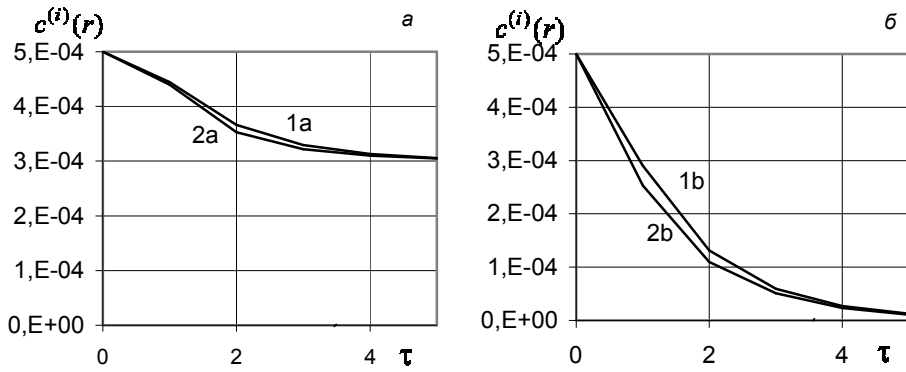


Рис. 9. Розподіли концентрації вологи в зернині $c^{(i)}(r)$ в часі τ для різних значень збурень температури: $A_{T1}=50$, $A_{T2}=50$ (рис.а), $A_{T1}=5$, $A_{T2}=5$ (рис.б)

Криві 1, 2 відповідають значенням безрозмірного радіуса $\bar{r}=0.1, 0.9$ відповідно

При досягненні цієї критичної швидкості (швидкості зважування), вага зернового шару компенсується силою тертя сушильного агента при взаємодії з підйомною силою, зерна спливають над решіткою і утримуються в газовому потоці, не спричиняючи ніякого тиску на решітку і значення \bar{z} вже не впливає на розподіли концентрації вологи. На рис. 8 продемонстровано розподіли концентрації вологи при сушінні зерна зі швидкістю зважування потоку сушильного агента залежно від значень коефіцієнта тертя сушильного агента з зерном $\tilde{\alpha}$.

Через одну годину від початку сушіння при значеннях коефіцієнта тертя $\tilde{\alpha}=0.1$ ми спостерігаємо накопичення вологи всередині зернини, величина якої навіть перевищує значення початкової вологи зерна (рис. 8а, крива 1а). На другій годині ми спостерігаємо початок періоду постійної швидкості сушіння. Він характеризується сталою швидкістю зниження вмісту вологи (за рівні проміжки часу видаляється однакова кількість вологи) і температурою матеріалу. Цей період триває до досягнення критичного значення вологовмісту, після цього видалення вологи припиняється. В оболонці, навпаки, вологовміст поступово починає зменшуватися одразу від початку сушіння (рис. 8б, крива 1б). Далі — процеси сушіння в ядрі та оболонці синхронізуються. Найефективніше відбувається сушіння зерна при значеннях коефіцієнта тертя $\tilde{\alpha}=2.5, 3.5$ (рис. 8, криві 4а, 5а, 4б, 5б).

З графіків на рис. 9а видно, що при перевищенні дозволених значень температури сушильного агента може виникнути загартування оболонки зернівки. Вона втрачає здатність пропускати вологу і відбувається здуття зерна. При правильному виборі температури сушильного агента та відповідній швидкості його потоку відбувається рівномірне сушіння зерна за усією його товщиною, причому вологи в ядрі зберігається більше, ніж в шкірці (рис. 9б).

Висновки. Досліджуючи сушіння зерна пшениці ОД-16 за трьох режимів псевдорозрідження в вертикальностінних апаратах, в яких швидкість розріджувального агента не перевищує швидкості віднесення дисперсного матеріалу, за винятком фонтануючого шару, в якому оброблений матеріал відноситься розріджувальним агентом, встановлено, що за першого режиму розташування зерна за глибиною шару, який осушується, відіграє суттєву роль в темпах його сушіння. Так, концентрація вологи зерна, що знаходиться на 1/10 висоти шару від місця подачі агента сушіння через 5 годин сушіння буде в 15 разів менша, ніж зерна, розташованого на 9/10 висоти шару. На значення тривалості сушіння зерна впливає величина швидкості продування v_z та коефіцієнт тертя сушильного агента та зерна $\tilde{\alpha}$. При недостатній швидкості потоку сушильного агента в режимі 1 для дуже вологого матеріалу (більше 24%) можливе виникнення запарювання зерна. Із збільшенням швидкості цього потоку (режим 2, 3) сила тертя сушильного агента та зерна збільшується, вага зернового шару компенсується силою тертя сушильного агента при взаємодії з підйомною силою, зерна спливають над решіткою і утримуються в газовому потоці. Найрезультативніше з погляду економії енергоресурсів відбувається сушіння зерна при значеннях коефіцієнта тертя $\tilde{\alpha} = 2.5$ та швидкості потоку сушильного агента $v_z = 1,5$ м/с.

При активних гідродинамічних режимах при надходженні гарячого повітря з двох камер зерно нагрівається найшвидше. Але температура в різних частинах зернини є неоднакова. Оболонка нагрівається більше, ніж ядро зернини. За неправильного вибору температури сушильного агента виникає загроза загартування оболонки. Для попередження загартування оболонок свіжозібраного зерна в вертикальностінних сушарках, коли тривалість сушіння досить велика, треба знижувати як температуру сушильного агента, так і температуру зерна. А при сушінні великих об'ємів зерна в апаратах імпульсного режиму сушильного агента необхідно проводити перерви між етапами сушіння для перерозподілу вологи з внутрішніх частин зернівки до поверхні.

Література

- [1] *Касаткин А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. — М.: Химия, 1971. — 784 с.
- [2] *Гальперин Н. И., Айништейн В. Г., Кваша В. Б.* Основы техники псевдоожижения. — М.: Химия, 1967. — 664 с.
- [3] *Сажин Б. С.* Гидродинамика взвешенного слоя. — М.: Изд. МТИ, 1978. — 87 с.
- [4] *Муштаев В. И.* Основные теоретические положения конвективной сушки и уточненный метод расчета сушильных аппаратов. — М.: МИХМ, 1971. — 81 с.
- [5] *Фролов В. Ф.* Моделирование сушки дисперсных материалов. — Ленинград: Химия, 1987. — 206 с.
- [6] *Гамаюнов Н. И., Ильченко Л. И.* Моделирование сушки порозных материалов. — Хим. пром., 1979. — № 6. — С. 344-348.
- [7] *Бутковский А. Г.* Характеристики систем с распределенными параметрами. Справ. пособие — М.: Физматлит, 1979. — 224 с.

- [8] Гинзбург А. С. Основы теории сушки пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность, 1973. — 528 с.
- [9] Сажин Б. С. Современные методы сушки. — М.: Знание, 1973. — 64 с.
- [10] Егоров Г. А. Технологические свойства зерна. — 1985. — М.: Агропромиздат, 1985. — 334 с.
- [11] Чапля Є.Я. Континуально-термодинамічні основи теорії твердих розчинів при локальних змінах стану компонент : Дис.... доктора ф.-м. наук : 01.02.04 / Є.Я. Чапля. — . нац. ун-т. — Львів, 1996. — 287 с.
- [12] Гайвась Б. І., Чапля Є. Я. Конвективне осушення зернистого матеріалу з врахуванням двошарової структури окремої зернини // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. — 2014. — Вип. 20. — С. 69-80.
- [13] Гайвась Б. І., Дмитрук В. А. Сушіння зерна в імпульсному режимі агента сушіння з врахуванням шаруватості структури зернини // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. — 2015. — Вип. 22. — С. 7-23.
- [14] Егоров Г. А. Теплофизические свойства единичного зерна // ЦНИТЭИ, Хлебпромформ, Информационный сборник. — Научно технические достижения и передовой опыт в области хлебопродуктов. — М.: 1996. — 68 с.
- [15] Егоров Г. А., Казаков Е. Д., Любушкин В. Т., Широкова Ж. П. Уточнение расчетных формул площади внешней поверхности и объема единичного зерна // Изв.вузов. Пищевая технология, — 1969.— № 4. — С. 34-37.

Drying of grain in active regimes taking into account its stratified structure

Bogdana Gayvas, Veronika Dmytruk, Anatolii Dmytruk

The peculiarities of modeling active modes of drying of grain are considered, approaches that are often used in engineering practice are analysed. Based on the fundamental solutions of the model proposed, the grain drying under active modes taking into account a two-layer structure of a separate grain is studied. A numerical analysis of temperature distribution and concentration of moisture in the grains' structural elements is carried out that found out the recommended basic settings of the drying process, namely, the temperature and the velocity of flow for drying agent to achieve uniform drying.

Сушка зерна в активных гидродинамических режимах с учетом слоистости его структуры

Богдана Гайвась, Вероника Дмитрук, Анатолий Дмитрук

Рассмотрены особенности моделирования активных гидродинамических режимов сушки зерна, проанализированы подходы, которые чаще всего применяются в инженерной практике. На основе фундаментальных решений модели механо-диффузии и теплопроводности в зерне и межзерновом слое исследованы особенности сушки зерна в активных гидродинамических режимах, учитывая двухслойную структуру отдельной зерновки. Проведено численное исследование распределений температур и концентраций влаги в структурных элементах зерновки, в результате которых рекомендованы определенные значения основных параметров процесса сушки, а именно, температуры и скорости потока сушильного агента для достижения равномерной сушки партии зерна пшеницы.

Отримано 10.04.16