

ТЕПЛО І МАСООБМІН ПРИ СУШІННІ І ОХОЛОДЖЕННІ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ У ЩІЛЬНОМУ РУХОМОМУ ШАРІ

Котов Борис Іванович д.т.н., професор
Вінницький національний аграрний університет
Калініченко Роман Андрійович к.т.н., доцент
Курганський Олександр Дмитрович аспірант
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Kotov B.

Vinnitsa National Agrarian University

Kalinichenko R.

Kurgan O.

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

Анотація: представлено математичний опис стаціонарного процесу тепло і масообміну при переміщенні зернового потоку і перехресній подачі газу.

Ключові слова: зерно, тепло і масообмін, нагрівання, сушіння, охолодження, перехресний рух, теплоносії.

Постановка проблеми

В практиці сільськогосподарських і переробних виробництв останнім часом широко використовують установки в яких зерновий потік перемішується у щільному неперемішуваному стані і обробляється потоком теплоносія або охолоджуючого агента у перехресному режимі (перехресний рух матеріалу газу).

Створення нових конструкцій сушильних установок пов'язано з розробкою високоефективних енергозберігаючих режимів сушіння і наступного охолодження зерна, забезпечуючих схоронність якості матеріалу при мінімальних затратах енергії.

Для обґрунтування режимів сушіння та охолодження матеріалів і визначення параметрів установки такого типу необхідно мати інформацію про зміну температури матеріалу і газу (в загальному випадку) в залежності від координат в напрямку їх руху і в часі. Отримання аналітичних розв'язків тепло і масообміну при перехресному русі класичними методами пов'язані із значними математичними складнощами. Але їх отримання можливе у наближених методах аналізу і належного спрощення елементів процесу. Тому одержання наближених розв'язків, які приводять до компактних розрахункових формул, залишається актуальною задачею, розв'язання якої спрощує дослідження процесів сушіння і охолодження матеріалів в колонкових і конвеєрних установках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Процеси тепло і масообміну в шарі дисперсного матеріалу досить глибоко описано і проаналізовано [1-7] в наукових виданнях. В роботах [1-5] подано спрощенні варіанти розрахунку сушіння при перехресному русі матеріалу і сушильного агента і отримання формули нестационарних полів температури і вологості у нерухомому шарі, які є основною для розрахунку експозиції процесів і визначення швидкості переміщення шару матеріалу; в ранніх роботах [4,5] подано наближені розв'язки системи рівняння в частинних похідних для отримання одномірних розподілів параметрів, в часі і за координатою. В [4] роботі наведено аналітичний розв'язок рівнянь тепло обміну в шарі матеріалу. Але питання розрахунків двомірного поля температури і вологості матеріалу і теплоносія залишились поза увагою.

Мета досліджень

Визначення закономірностей тепло і масообміну в рухомому шарі зернових матеріалів при фільтрації газу для стаціонарного режиму роботи установки.

Результати досліджень

В стаціонарному (усталеному) режимі роботи установки з прекрасним рухом матеріалу і газу, параметри зерна і тепло(холодо) носія в кожній точці простору не змінюються в часі. Як показано в роботі [3] процеси стаціонарного тепло і масо обміну, в даному випадку будуть подібні до нестационарних процесів в нерухомому шарі при фільтрації теплоносія.



Розглядається шар матеріалу який рухається в напрямку вісі ОХ. Витрати матеріалу G_3 . Теплоносії подається нормально до шару матеріалу в напрямку ОУ з масовими витратами G_v . Висота (товщина) шару H , шлях переміщення L (наприклад довжина конвеєра). Температура тепло(холодо) носія на вході незмінна в часі. Необхідно визначити розподіл параметрів процесу: температури зерна і газа, вологовміст зерна.

Для рішення такої задачі прийнято такі спрощені припущення:

- процеси внутрішнього тепло- і масо переносу відбуваються безградієнтно;
- тепло- і масообмін відбуваються конвективно, усі інші складові обмінних процесів враховуються коефіцієнтом теплообміну ;
- теплофізичні параметри середовищ в часі незмінні ;
- втрати теплоти в навколишнє середовище відсутні .

Враховуючи аналогію між нестационарними процесами тепло і масообміну в нерухомому шарі і використовуючи очевидні співвідношення :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = v_3 \frac{\partial \theta}{\partial y}; \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = v_v \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

Можна використати отриману раніше [6,7] систему рівнянь в наступному вигляді

$$\begin{cases} K_1 \frac{\partial t}{\partial x} + t = \theta & (1) \\ K_2 \frac{\partial \theta}{\partial y} + \theta = t & (2) \end{cases}$$

$$\text{де: } K_1 = \frac{G_v C_p H V_v}{\alpha F} = \frac{1}{A} \quad K_2 = \frac{C_3 (1 + \frac{1}{Rb})}{\delta \alpha} = \frac{1}{B}$$

t , - температура теплоносія і зерна, α , F - коефіцієнт і поверхня теплообміну, δ - питома поверхня, C_p , C_3 - питома теплоємність теплоносія і зерна, $Rb = C_3 d\theta / rdU$, U - вологовміст зерна, r - питома теплота випаровування води.

Розв'язок системи рівнянь (1) і (2) проведено за схемою [5] : підставивши в рівняння (2) величину і її похідну з рівняння (1) після перетворення матимемо

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y \partial x} + A \frac{\partial \theta}{\partial x} + B \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

Гіперболічне рівняння другого порядку, розв'язок якого при початкових умовах

$$\theta|_{x=0} = \theta_1, t|_{y=0} = t_1$$

де θ_1, t_1 параметри зерна і теплоносія на вході в установку) відомий [5].

$$\theta(x, y) = \theta_1 + \Delta T_1 B e^{-Ay} \int_0^x e^{-Bx} \cdot I_0(2\sqrt{AByx}) dx \quad (4)$$

$$t(x, y) = \theta_1 + \Delta T_1 B e^{-Ay} \left[e^{-Bx} \cdot I_0(2\sqrt{AByx}) + B \int_0^x e^{-Bx} \cdot I_0(2\sqrt{AByx}) dx \right] \quad (5)$$

де $I_0(2\sqrt{AByx})$ - функція бесселя нульового порядку.

Визначивши значення $\theta(x, y)$ за допомогою критерію Ребіндера, можна визначити розподіл вологовмісту $U(x, y)$ зерна в шарі, з критерію Ребіндера маємо :

$$-dU = K_3 d\theta \quad (6)$$

$$\text{де } K_3 = \frac{C_3}{r \cdot Rb}$$

Інтегруючи рівняння (6) в межах від U_1 до U і від θ_1 до θ будемо мати :

$$U(x, y) = U_1 + K_3 \theta_1 - K_3 \theta(x, y) \quad (7)$$



Для скорочення розрахунків можна спростити рівняння (4) та (5) розклавши функцію Бесселя в ряд і обмежуючись тільки першим членом ряду, тобто $I_0(2\sqrt{AByx}) = 1$

Тоді з рівняння (4) та (5) отримуємо :

$$\theta(x, y) = \theta_1 + \Delta T_1 e^{-Ay} (1 - e^{-Bx}) \quad (8)$$

$$t(y) = \theta_1 + \Delta T_1 e^{-Ay} \quad (9)$$

Розподіл вологовмісту зерна в рухомому шарі при перехресному русі буде визначатися з рівняння

$$U(x, y) = U_1 + K_3 \theta_1 - K_3 [\theta_1 + \Delta T_1 e^{-Ay} (1 - e^{-Bx})] \quad (10)$$

Тим чином, двомірні поля температури і вологовміст зерна в рухомому шарі можна визначити з рівнянь (7) і (9).

Процес охолодження матеріалу розраховується за формулами (7) і (9) при початковій умові $\theta_1 > t_1$.

Висновки

1. Створена спрощена математична модель процесів нагріву, сушіння та охолодження зерна при перехресному русі матеріалу і газу
2. Отримані спрощені формули, якими визначаються поля температури і вологовмісту матеріалу.

Список літератури

1. Зеленко В.И. Конвективная сушка сельскохозяйственных материалов в плотном слое / В.И. Зеленко. Тверь. Тверское областное книжно-журнальное издательство. 1998. -96 с.
2. Кей Р.Б. Введение в технологию промышленной сушки / Р.Б. Кей. Минск «Наука и техника». 1983. – 26с.
3. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф.Фролов. Ленинград «Химия» 1987. -208 с.
4. Анискин В.И. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием / В.И. Анискин, В.А. Рыбарук. М. Колос. 1972-194 с.
5. Рабинович Г.Д. Тепло и массообмен при сушке измельченных пастообразных материалов в плотном слое / Г.Д.Рабинович, В.И. Хорев // Инженерно-физический журнал. 1965. т.9. №5. С. 640-646.
6. Котов Б.И. Метод сушіння сільськогосподарських матеріалів у нерухомому шарі активним вентилуванням / Б.И. Котов, С.П. Степаненко, В.О. Швидя // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – №1. С.48-51.
7. Котов Б.И. Тепло і масообмін при сушінні сільськогосподарських матеріалів у нерухомому шарі / Б.И. Котов, А.В. Спірін, Р.А. Калініченко // Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2016. – №2. С. 24-28.

References

1. Zelenko V.I. Konvektivnaya sushka sel'skokhozyaystvennykh materialov v plotno sloye / V.I.Zelenko. Tver'. Tverskoye oblasnoyknizhno-zhurnal'noye izdatel'stvo. 1998.- 96s.
2. Key R.B. Vvedeniye v tekhnologiyu promyshlennoy sushki / R.B. Key. Minsk «Nauka i tekhnika». 1983. - 26s.
3. Frolov V.F. Modelirovaniye sushki dispersnykh materialov / V.F. Frolov. Leningrad. »Khimiya». 1987. -208s.
4. Aniskin V.I. Teoriya i tekhnologiya sushki i vremennoy konservatsii zerna aktivnym ventilyrovaniyem / V.I. Aniskin, V.A. Rybaruk. M.Kolos. 1972.-194s.
5. Rabinovich G.D. Teplo i massoobmen pri sushke izmel'chennykh pastoobraznykh materialov v plotno sloye / G.D.Rabinovich, V.I. Khorev // Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. 1965.t.9. – №5. s. 640-646.
6. Kotov B.I. Metod sushinnya silskohospodarskykh materialiv u nerukhomosty shari aktyvnym ventilyuvannyam / B.I. Kotov, S.P. Stepanenko, V.O. Shvyd // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. – 2016. – №1. S.48-51.
7. Kotov B.I. Teplo y masoobmin pry sushinni silskohospodarskykh materialiv u nerukhomosty shari / B.I. Kotov, A.V. Spirin, R.A. Kalinichenko // Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2016. №2. s. 24-28.

ТЕПЛО И МАССОБМЕН ПРИ СУШКЕ И ОХЛАЖДЕНИИ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА В ПЛОТНОМ ПОДВИЖНОМ СЛОЕ

Аннотация: представлены математическое описание стационарного процесса тепло и массообмена при перемещении зернового потока и перекрестной подачи газа.

Ключевые слова: зерно, тепло и массообмен, нагрев, сушка, охлаждение, перекрестное движение, теплоноситель.

HEAT AND MASS TRANSFER IN DRYING AND COOLING GRAIN MATERIAL IN A DENSE MOVING LAYER

Summary: a mathematical description of the process of stationary heat and mass transfer at moving the grain flow and cross the gas supply.

Keywords: grain, heat and mass transfer, heating, drying, cooling, cross motion coolant.