124,5 тис. грн за умови 25% завантаження; індекс прибутковості значно перевищує 1; термін окупності проекту складає близько 4 місяців.

Висновки. Економічні розрахунки довели, що розробка ультразвукового пристрою є доцільним, ефективним інвестиційним проектом, який може бути реалізований на діючих підприємствах, оскільки виконуються всі умови, що висуваються до критеріїв економічної ефективності інвестицій: значення чистого дисконтованого доходу є позитивним і складає значну величину, індекс прибутковості значно перевищує 1, термін окупності проекту складає близько чотирьох місяців. Коригування даних показників з урахуванням коефіцієнта завантаження проектної потужності машини підтвердило, що необхідні умови ефективності застосування ультразвукового пристрою для отримання водно-жирових емульсій виконуються повною мірою.

Список літератури

1. Ковалёв, В. В. Методы оценки инвестиционных проектов [Текст] / В. В. Ковалёв. – М. : Финансы и статистика, 1999. – 144 с.
2. Бирман, Г. Капиталовложения. Экономический анализ инвестиционных проектов [Текст] / Г. Бирман, С. Шмидт; пер. с англ. под ред. Л. П. Белых. – М. : Банки и биржи: ЮНИТИ, 1997. – 632 с.
3. Методика визначення ефективності витрат на наукові дослідження і розробки та їх впровадження [Текст] / Міністерство освіти і науки України, Департамент науки і технологій. – К., 2002. – 32 с.
4. Афанасьєв, М. В. Оцінка ефективності організаційно-технічних заходів [Текст] / М. В. Афанасьєв, Л. І. Телишевська, В. І. Рудика. – Х. : ІНЖЕК. 2002. – 286 с.

Отримано 31.03.2010. ХДУХТ, Харків.

УДК 664.834.2

М.М. Цуркан, канд. техн. наук, доц.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ

Розглянуто питання визначення шляхів підвищення енергоефективності процесу сушіння на основі аналізу рівняння енергетичного балансу для відповідної модельної термодинамічної системи.

Рассмотрен вопрос определения путей повышения энергоэффективности процесса сушки на основе анализа уравнения энергетического баланса для соответствующей модельной термодинамической системы.

The question of determination of ways of increase of energyefficiency of dryingprocess is considered on the basis of analysis of equalization of power balance for the proper model thermodynamics system.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Підвищення енергоефективності технологічних процесів у харчовій промисловості є пріоритетною проблемою для галузевої науки. Процеси сушіння харчової сировини є досить енергозатратними, тому потребують особливої уваги з боку науковців, які опікуються даною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дані дослідження виконані у рамках наукової концепції, відповідно до якої процес сушіння являє собою еволюцію визначеної термодинамічної системи з початкового нерівноважного стану до стану рівноваги, що відповідає закінченню процесу. Робота є продовженням досліджень у напрямку підвищення енергоефективності процесів сушіння харчової сировини, які проводяться Центром сушіння ХДУХТ.

Мета та завдання статті. Цю статтю присвячено аналітичному дослідженню процесу сушіння на основі аналізу рівняння енергетичного балансу для відповідної модельної термодинамічної системи з метою підвищення енергоефективності процесу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Як модель досліджуваної системи (система 1) оберемо відкриту однофазну двокомпонентну систему. Такій моделі відповідають реальні колоїдні капілярнопористі тіла в гігроскопічній області, в яких видалено вільну поверхневу вологу (включаючи макрокапіляри), яку можна вважати гомогенною рідкою фазою. Решта вологи (зв'язана вода) має різні межі розділу із сухим скелетом тіла і різні фізичні властивості (декілька дисперсних фаз) і тому її можна умовно не вважати самостійною фазою.

Таким чином, компонентами системи 1 є вода (вода, яка видаляється в даному процесі або «рухома вода») і «суха» частина матеріалу, яка містить сухий скелет матеріалу і «зв'язану» воду (вода, яка не видаляється у даному термодинамічному процесі).

Навколишнє середовище є однофазною системою (пароповітряна суміш) з постійними параметрами (система 2).

Вважатимемо, що на межі двох систем включаючи фізичну поверхню системи 1 (об'єкт сушіння) і пригранічний шар системи 2 існують постійні градієнти деяких властивостей обох систем постійних напрямів, тобто системи знаходяться далеко від рівноваги.

Як початкові умови оберемо наступні:

$$T_1 < T_2, \; h_1 > h_2, \tag{1}$$

де h_1 і h_2 − парціальний тиск водяної пари відповідно у пригранічному шарі та у системі 2.

Оберемо питомий об'єм, не пов'язаний з дією поверхневих сил, і, таким чином, початкова умова $h_1 > h_2$, перетвориться у наявність градієнта концентрації або щільності рідкої компоненти на його межі.

У загальному випадку повна питома енергія системи складається з питомих кінетичної, потенціальної φ і внутрішньої енергії *u*:

$$e = \frac{1}{2}v^2 + \varphi + u\,. \tag{2}$$

А закон збереження енергії в локальній формі за відсутності внутрішніх джерел має вигляд:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla J_e = 0\,. \tag{3}$$

Для того, щоб записати даний закон в явному вигляді необхідно оцінити внески різних складових енергії *e* і її потоку J_e.

Питома енергія рідкої компоненти (вологи, що видаляється в процесі сушіння) складається з питомої кінетичної енергії дифузії та внутрішньої енергії:

$$e_p = e_\kappa + u_p\,, \tag{4}$$

де $e_\kappa = \frac{1}{2}v^2$ − питома кінетична енергія дифузії рідкої компоненти зі швидкістю *v*.

Питома енергія твердої компоненти (сухого скелета і зв'язаної вологи) у відсутності складових механічної енергії тотожно дорівнює її питомій внутрішній енергії

$$e_m = u_m. \tag{5}$$

Виходячи з того, що внутрішня енергія є різницею між повною енергією системи і її механічною енергією, запишемо рівняння балансу для кожної компоненти системи. При цьому врахуємо, що баланс кінетичної енергії системи за відсутності зовнішніх сил включає джерело σ_u, пов'язане з появою неоднорідностей, які описуються тензором градієнта швидкостей

$$\sigma_u = P\nabla v\,, \tag{6}$$

де *P* − нерівноважна частина тензора тиску зворотна тензору (P = −T). Таким чином, для рідкої компоненти запишемо:

$$\frac{\partial \rho_p u_p}{\partial t} + \nabla (J_{qp} + \rho_p u_p v) = -P \nabla v\,, \tag{7}$$

для твердої

$$\frac{\partial \rho_m u_m}{\partial t} + \nabla J_{qm} = 0\,, \tag{8}$$

де J_{qp} і J_{qm} v теплові потоки, відповідно, рідкої та твердої компоненти системи. Тут ми скористалися визначенням теплового потоку у вигляді

$$J_q = J_u - \rho u v\,, \tag{9}$$

де $\rho u v$ − конвективна (або дифузійна) складова переносу внутрішньої енергії.

Складаючи рівняння (9) і (10) отримаємо рівняння балансу сумарної питомої внутрішньої енергії системи

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla J_q = -\nabla (\rho_p u_p v) - P \nabla v\,. \tag{10}$$

Рівняння (10) є локальною формою першого початку термодинаміки, де права частина дорівнює роботі системи внаслідок отриманого теплового потоку.

Якщо за показник енергоефективності процесу K_{ee} прийняти відношення локальної роботи системи до локальної щільності теплового потоку, то отримаємо наступну умову

$$\frac{1}{\nabla J_q} \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + 1 = K_{ee} = \max \tag{11}$$

Оскільки потік теплоти в середину локального об'єму Jq має негативне значення, ця залежність показує, що похідна $\frac{\partial \rho u}{\partial t}$ повинна мати максимальне негативне значення. Виходячи з цього, на підставі рівняння (10) ми можемо записати цю умову у вигляді

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} = -(\nabla J_q + \nabla \rho_{ж} u_{ж} v + P \nabla v) = -\max \tag{12}$$

Це означає, що для всіх складових правої частини залежності (12) повинні виконуватися наступні умови:

$$\nabla J_q = \max\,, \tag{13}$$

$$\nabla \rho_{ж} u_{ж} v = \max \ , \qquad (14)$$

$$P \nabla v = \max \ . \qquad (15)$$

Розглянемо окремо кожну з вищезгаданих умов. При цьому вважатимемо задачу одновимірною, тобто розглядатимемо всі наявні потоки уздовж однієї координати (уздовж напряму максимальних градієнтів температури і вологовмісту).

Щільність потоку теплоти Jq в лінійному наближенні описується законом Фур'є

$$J_q = \lambda \nabla T \ . \qquad (16)$$

Максимум градієнта температури визначатиметься, в першу чергу, граничними умовами, а саме: температурою навколишнього середовища (допустимою температурою сушильного агента).

Проте з рівняння (11) виходить також, що показник K_{ee} має максимум за мінімально можливого теплового потоку для реалізації даного процесу ($\nabla J_q = \min$), який насамперед забезпечується умовою $\nabla T = \min$. За фіксованої величини градієнта температури величина Jq буде визначатися функціональною залежність коефіцієнта λ від параметрів процесу, і умову (13) можна записати, як $\lambda = \max$. До того ж ця умова забезпечує «керованість» процесом в частині варіювання значенням ∇T .

У загальному випадку коефіцієнт λ для більшості матеріалів залежить від їх щільності, вологовмісту і температури. Оскільки досліджуваний процес проходить за постійної температури навколишнього середовища, то температурною залежністю можна нехтувати. Тобто, λ функціонально залежить від щільності матеріалу ρ і його вологовмісту *w*, що визначається щільністю рідкої компоненти ρ_p. Оскільки ці величини в загальному випадку залежать від координат і часу, тобто є польовими величинами, то і λ є польовою величиною λ = λ(r, t).

Оскільки $\rho = \rho_m + w\rho_m$, то вимірюючи експериментально залежності λ від щільності (дисперсності) і вологовмісту, і, відповідно, залежності ρ_m і *w*, можна отримати залежність λ = λ(r, t). Визначаючи початкове значення λ_0 і уявивши цю залежність у вигляді

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda(r,t), \qquad (17)$$

можна визначити момент «зриву» теплового потоку, який визначається значенням близько 0,25 Вт/м·К (за якого матеріал стає «теплоізолятором»).

Виходячи з функціональної залежності, умова (13) поділяється на дві складові:

$$\nabla J_q = \nabla\lambda\nabla T + \lambda\Delta T = \max . \qquad (18)$$

Таким чином, градієнт теплового потоку (за одновимірної задачі) визначатиметься як градієнтом температури, так і градієнтом коефіцієнта теплопровідності та його функціональною залежністю на підставі відповідних експериментальних даних. Виходячи з якісного аналізу можна припустити, що існує оптимальне співвідношення між дисперсністю матеріалу і його вологовмістом, яке забезпечує максимальне значення λ.

Проаналізуємо умову (14). Оскільки питома внутрішня енергія рідкої компоненти $\rho_p u_p$ залежить від потоку теплоти і вологовмісту, то визначальною величиною в цій умові буде швидкість дифузії вологи *v*. У свою чергу її величина буде пропорційна швидкості зміни вологовмісту або щільності ρ_p.

Запишемо рівняння локального балансу маси для рідкої компоненти

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} = -\nabla J_p . \qquad (19)$$

Проаналізуємо функціональну залежність щільності потоку вологи J_p, який в лінійному наближенні описується законом Фіка:

$$J_p = D \cdot \nabla \rho_p , \qquad (20)$$

де D − коефіцієнт дифузії.

Враховуючи, що щільність сухої частини матеріалу можна вважати постійною і залежність ρ_p. від вологовмісту, запишемо рівняння (20) у такому вигляді:

$$J_p == \rho_m \cdot D \cdot \nabla w . \qquad (21)$$

Якісний аналіз цієї залежності показує, що за малої щільності сухої компоненти (у разі дисперсної системи) дифузійний потік зменшується. Очевидно, що існує оптимальне співвідношення між значеннями ρ_p і w, яке вимагає експериментальної перевірки.

Оскільки вологовміст w є величиною похідною від даного процесу, а величина ρ_m − заданою, то особливий інтерес являє функціональна залежність коефіцієнта дифузії D. У загальному випадку, як і коефіцієнт теплопровідності λ, коефіцієнт D залежить від щільності, вологовмісту, температури і, таким чином, також є польовою величиною $D = D(r, t)$.

Виходячи з цих міркувань запишемо (21) у вигляді

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla J_{жс} = -(\nabla D \nabla w + D\Delta w), \tag{22}$$

де величину ∇D розділимо на дві складові, враховуючи функціональну залежність коефіцієнта $D = D(\rho_m, w, T)$ і умова $\nabla \rho_m = const$:

$$\nabla D = \nabla D(w) + \nabla D(T) = \frac{\partial D}{\partial w}\nabla w + \frac{\partial D}{\partial T}\nabla T\,. \tag{23}$$

Виходячи з того, що перший доданок даної залежності визначається «ходом» процесу, проаналізуємо температурну залежність коефіцієнта D, яка буде визначальною для максимального значення ∇D.

Обрана модель системи (однофазна, двокомпонентна) є моделлю твердого розчину впровадження (молекули води «впроваджені» в сухий скелет матеріалу). Як відомо, дифузія в таких розчинах відбувається завдяки подоланню дифундуючими молекулами певного енергетичного бар'єру, внаслідок чого вони «перестрибують» на нове «рівноважне» місце. «Вакантні» місця в нашій моделі забезпечуються градієнтом концентрації. Тому незалежно від напряму потоку теплоти дифузія молекул води відбуватиметься у напрямі зменшення вологовмісту, але максимальна швидкість досягатиметься збігу градієнтів зменшення вологовмісту і температури. Це означає, що досліджуваний локальний об'єм повинен мати «внутрішнє джерело теплоти» (наприклад, під впливом зовнішніх силових полів) або ж напрям градієнтів повинен бути просторово «організованим» (ЗТП-сушіння).

Для остаточного аналізу умови (14) запишемо його в «розгорнутому» вигляді

$$\nabla \rho_p u_p v = \nabla(\rho_p u_p)\cdot v + (\rho_p u_p)\cdot \nabla v = \max\,. \tag{24}$$

Дана залежність показує, що питома внутрішня енергія і швидкість дифузії, а також їх градієнти повинні мати максимальні значення, і до того ж градієнти повинні мати один напрям. Умова максимуму питомої внутрішньої енергії може бути пов'язана з максимальним потоком теплоти або відповідними початковими умовами (попередній розігрів матеріалу). Умова максимуму швидкості дифузії за фіксованого значення градієнта вологовмісту забезпечується досягненням максимального значення коефіцієнта дифузії (задаванням відповідних початкових умов і параметрів процесу) на підставі відповідних експериментальних залежностей.

Умову (15), яка характеризує роботу системи, пов'язану з порушенням механічної рівноваги між компонентами системи (явище «самодиспергування»), проаналізуємо виходячи з рівняння локального балансу імпульсу в питомому об'ємі системи

$$\rho a + \nabla P = \rho F\,, \tag{25}$$

де P − нерівноважна частина тензора тиску (Р = −Т), F − сила тяжіння. Мінімальний імпульс в напрямі перпендикулярному F, тому

$$\rho a = -\nabla P\,. \tag{26}$$

У свою чергу

$$\nabla P = K \cdot \nabla v\,, \tag{27}$$

де K − коефіцієнт пропорційності.

Тому «тріщиноутворення» визначається тільки співвідношенням щільності системи і градієнта швидкості дифузії. Тому повинні бути створені умови для випереджаючого зменшення щільності системи в порівнянні із зменшенням градієнта швидкості дифузії або, інакше кажучи, підтримка максимального градієнта швидкості дифузії на завершальній стадії процесу (наприклад, впливом зовнішніх силових полів).

На закінчення слід зазначити, що даний аналіз не враховує всі «якісні» зміни в системі, які є невід'ємною частиною поняття «енергоефективності». Повний аналіз повинен включати і рівняння ентропійного балансу системи, що є предметом окремих досліджень.

Висновки. Таким чином, аналіз балансу питомої внутрішньої енергії дає можливість задати параметри процесу максимальною енергоефективністю на підставі встановлення функціональних залежностей коефіцієнтів теплопровідності і дифузії, а також обрати найбільш ефективний спосіб підведення енергії.

Отримано 31.03.2010. ХДУХТ, Харків.