

УДК 637.33

Р.М. Леус

І.Ф. Максименко

Національний університет  
харчових технологій

## ОСОБЛИВОСТІ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ В УМОВАХ ВАКУУМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Досліджено особливості перебігу фазових переходів в умовах вакуумних технологій, показана необхідність уточнення аналогів показників адиабати в зоні вологої насиченої пари, наведена інформація на користь доцільності створення локальних замкнутих систем енергокористування.*

**Ключові слова:** вакуум, термодинаміка, адиабата, пара, зона, технологія.

*The features of the passage of phase transformations in vacuum technology, shows the need to clarify the analogs of exponents in the adiabatic zone of moist vapor, contains information about the benefits of the feasibility of establishing local closed systems energy use.*

**Key words:** vacuum, thermodynamics, adiabatic, vapor zone, technological energy.

Фазові переходи від рідинної складової до пари мають широке розповсюдження в харчових і мікробіологічних технологіях і стосуються процесів випарювання, перебігу окремих процесів дискретно-імпульсних технологій, вакуумного упаковування продукції тощо.

Зниження тисків в системі парорідинного середовища приводить до обмеження температур його кипіння, що може мати різне призначення. Так за використання кількакаскадної випарної станції 1 кг первинної пари дозволяє отримати 5–6 кг вторинної, що само по собі слід вважати важливим технічним результатом. Технології вакуумного упаковування продукції супроводжуються фізичними, термодинамічними і, навіть, летальними ефектами по мікрофлорі, яка присутня на продуктах харчування, тарі, матеріалах, з яких формується оболонка упаковки [3–5].

Хоча загальні положення фізики перебігу названих процесів відомі, однак особливості їх організації потребують окремих уточнень і визначення термодинамічних параметрів. Саме останнє склало мету і завдання цього дослідження.

Вакуумне випаровування рідинної фази супроводжується необхідністю безперервного підведення енергетичного потоку, який повинен компенсувати втрату теплової енергії у зв'язку з генеруванням парової фази. Така компенсація доповнюється енергетичними витратами, пов'язаними з виведенням з системи утвореної парової фази за рахунок використання вакуумних насосів або термобарометричних конденсаторів.

При цьому очевидно, що за використання вакуумних насосів парова фаза повинна стискатися мінімально до величини атмосферного тиску або до показника, що атмосферний тиск перевищує. За вказаних умов виникає можливість використання вторинної пари в локальному енергетичному контурі для подальшого підтримання її генерування. Доцільність створення локального енергетичного контуру визначається показниками енергетичного балансу. Відомо, що теплота утворення парової фази і теплота її конденсації залежать від тисків, зі збільшенням яких вона зменшується. Це означає, що зі зближенням тисків випаровування середовищ і тисків виведення пари з системи різниця між теплотою пароутворення і конденсації пари зменшується. З точки зору інтересів оцінки термодинамічних параметрів скористаємося умовами енергетичних балансів. При цьому враховується стан вологої насиченої пари за показниками тиску, температури і ступе-



**Розділ 1. Процеси та апарати ... виробничих процесів**

За наших умов при  $x = 0,9$  маємо

$$k = 1,035 + 0,1 \cdot 0,9 = 1,125. \quad (4)$$

Оскільки адіабата  $M - M'$  перетинає лінію сухості  $x = 1$ , то це означає необхідність використання двох умов для визначення коефіцієнта  $k$ .

Тоді для ділянки  $M - M''$  маємо  $k = 1,125$ , а для ділянки адіабати  $M'' - M' - k = 1,3$ .

На основі принципу суперпозиції і з врахуванням знайдених значень  $k$  звернемося до оцінки можливості використання теоретичних співвідношень, які стосуються адіабатних процесів в теорії газів. Відомими є співвідношення між тисками і температурами газових середовищ в адіабатних процесах:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad (5)$$

$$\ell = \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1), \quad (6)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  — відповідно початковий і кінцевий тиски;  $T_1$  і  $T_2$  — початкова і кінцева абсолютні температури пари відповідно.

Для зазначеного тиску  $P_1 = 0,1$  бара знайдемо [1]  $t_1 = 45,83$  °C або  $T_1 = 318,98 \approx 319$  K, а точці  $M''$  відповідає тиск 0,9 бара.

З урахуванням умови (5) знайдемо:

$$T_2 = 319 \left(\frac{0,9}{0,1}\right)^{\frac{1,125-1}{1,125}} = 406,2 \text{ K} = 133,2$$
 °C

Однак тиску насиченої пари  $P = 0,9$  бара відповідає температура  $t = 96,71$  °C. Похибка визначення температури в точці  $M''$  складає біля 38 %, що не може вважатися задовільним результатом і, очевидно, що вона пов'язана з коефіцієнтом  $k$ , значення якого може бути уточненим за відомих термодинамічних параметрів. У зв'язку з цим запишемо:

$$\lg T_2 = \lg T_1 + \frac{k-1}{k} \lg \left(\frac{P_2}{P_1}\right). \quad (7)$$

Звідси маємо

$$\frac{k-1}{k} = \frac{\lg T_2 - \lg T_1}{\lg \left(\frac{P_2}{P_1}\right)} \quad (8)$$

і остаточно

$$k = \frac{1}{1 - \frac{\lg T_2 - \lg T_1}{\lg \left(\frac{P_2}{P_1}\right)}}. \quad (9)$$

Підстановка значень  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $P_1$  та  $P_2$  приводить до результату  $k = 1,073$ .

За такого значення одержуємо значення

$$T_2 = 319 \left(\frac{0,9}{0,1}\right)^{0,068} = 370,4 \text{ K} = 97,4$$
 °C

і похибка визначення температури  $T_2$  тепер складає 0,7 %.

## Розділ 1. Процеси та апарати ... виробничих процесів

Виконаємо перевірку можливості використання визначеного параметра  $k = 1,073$  в умовах стиснення, що відбувається в зоні вологої насиченої пари. Нехай при цьому  $P_1 = 0,5$  бара,  $x = 0,9$ ,  $T_1 = 354,5$  К і  $P_2 = 1,0$  бара. Тоді

$$T_2 = 354,5 \left( \frac{1,0}{0,5} \right)^{0,068} = 411,62 \text{ К} = 99 \text{ }^\circ\text{C}.$$

В цьому випадку відхилення значення  $T_2$  складає 1 % від табличного, що дозволяє оцінити результат по визначенню показника  $k$  задовільним і таким, що може використовуватися в залежностях, які відповідають адіабатним процесам.

На цій основі визначимо роботу стиснення 1 кг пари:

$$\ell = \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1) = \frac{0,461}{0,073} (373 - 354,5) = 116,9 \text{ кДж/кг}.$$

Ентальпія вологої пари визначається з врахуванням ступеня сухості

$$i_x = i' + gx,$$

де  $i'$  — ентальпія води;  $g$  — теплота пароутворення.

Для наших умов визначаємо [1]:  $P_1 = 0,5$  бара;  $i'_1 = 340,57$  кДж/кг;  $g_1 = 2305,4$  кДж/кг;  $x_1 = 0,9$ ;  $P_2 = 1,0$  бара;  $i'_2 = 417,51$ ;  $g_2 = 2258,2$  кДж/кг;  $x_2 = 0,93$ . Тоді за формули для вологої пари

$$i''_1 = i'_1 + g_1 x_1 = 340,57 + 2305,4 \cdot 0,9 = 2415,73 \text{ кДж/кг};$$

$$i''_2 = i'_2 + g_2 x_2 = 417,51 + 2258,2 \cdot 0,93 = 2517,6 \text{ кДж/кг},$$

а зростання ентальпії становитиме:

$$\Delta i'' = i''_2 - i''_1 = 2517,6 - 2415,73 = 101,87 \text{ кДж/кг}.$$

Порівняння розрахункової величини  $\ell$  і одержаного перепаду ентальпій  $\Delta i''$  є підставою для ствердження, що стосовно зони вологої насиченої пари використання формули по визначенню роботи адіабатного стиснення газів можливе, як і оцінка ефективності створення локального замкнутого енергетичного контуру. Вторинна пара з тиском  $P_2$  повинна повертатися в систему нагрівання середовища і віддавати його теплоту конденсації. За ізобарного процесу в результаті конденсації кількість повернутої теплової енергії становитиме:

$$q = i''_2 - i'_2,$$

а ефективність введення в контур роботи  $\ell$  стиснення пари визначається показником

$$\beta = \frac{i''_2 - i'_2}{\ell}.$$

За обраних умов в останньому випадку отримуємо:

$$\beta = \frac{2517,6 - 417,51}{116,2} = 18,07.$$

**Висновки.** Виконаний аналіз особливостей перебігу енергетичних трансформацій в вакуумованій системах дозволяє відмітити наступне.

1. Випаровування рідинної фази з середовищ в умовах вакуумування супроводжується можливістю збереження в них біологічно цінних компонентів, вітамінів, інших структур, стосовно яких дії високих температур є небажаними.

2. Визначення меж термодинамічних трансформацій складових середовищ доцільно здійснювати з використанням таблиць з даними властивостей води і водяної пари. Разом з тим підтверджена можливість використання термодинамічних співвідношень, які стосуються адіабатних процесів стиснення газових

## *Розділ 1. Процеси та апарати ... виробничих процесів*

---

середовищ. В цьому дослідженні адіабатним прийнято процес стискання вторинної пари на підставі його швидкоплинного перебігу.

3. Показано, що стосовно зони вологої насиченої водяної пари рекомендовані в літературі значення аналогів показників адіабат приводять до помітних відхилень від реальних термодинамічних параметрів в їх трансформаціях. Для ліквідації вказаного недоліку запропоновано нову розрахункову модель.

4. Наведені дані щодо енергетичних витрат на стискання вторинної пари і кількості рекуперованої теплової енергії в системі однозначно вказують на доцільність створення локальних замкнутих систем енергозабезпечення процесів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. — М.: изд-во стандартов. — 1969. — 408 с.
2. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. — М.: Машиностроение. — 1973. — 344 с.
3. Соколенко А.І., Костін В.Б., Васильківський К.В. та ін. Фізико-хімічні методи обробки сировини та продуктів харчування. — К.: АртЕк. — 2000. — 306 с.
4. Соколенко А.И., Українець А.И., Яровой В.Л. и др. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение. — К.: АртЭк. — 2003. — 432 с.
5. Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Піддубний В.А. та ін. Фізико-хімічні методи обробки сировини і стабілізація харчових продуктів. — К.: Люксар. — 2009. — 454 с.

*Надійшла до редколегії 12.05.2011 р.*