

## PHASE TRANSITIONS

O. Shevchenko, A. Sokolenko, I. Maksymenko, K. Vasylykivsky

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Phase transition  
Pressure  
Equilibrium  
Vacuum  
Thermodynamics  
Energy exchange  
Le Chatelier principle*

---

**Article history:**

Received 18.03.2021  
Received in revised form  
08.04.2021  
Accepted 22.04.2021

---

**Corresponding author:**

O. Shevchenko  
**E-mail:**  
npnuht@ukr.net

**ABSTRACT**

---

The paper gives an overview of the peculiarities of the existence of thermodynamic systems in equilibrium states and in the modes of transient processes, which in a significant number of cases correspond to phase transitions of the first type.

It was shown that the input material flows of the main raw materials and the flows of additional provision with the corresponding material resources were at the same time carriers of energy potentials, which should be preserved as much as possible and represented in the products of enterprises. Transformations of these internal potentials occur including under the influence of external energy flows.

There were two groups in the estimates of the internal energy of systems in the forms of transition from one system to another. The first included the form of the transition of motion by thermal conductivity, and the measure of motion was heat. The general measure in the second group of motion transmission was work.

Stabilization of pressure in the system in the phase transition mode meant temperature stabilization during the processes of condensation or evaporation, which allowed to stabilize the energy exchange processes both in the direction of heat input into the system and, conversely, output from it.

The intensity of the phase transitions was determined by the values of the driving factors in the form of differences in temperature, concentration, pressure, special conditions. In special discrete-pulse technologies, the depth of entry (introduction) of the medium to the unbalanced state and the speed of forced transfer to it were crucial.

Technologies of vacuum processing of berry, fruit and vegetable products allowed to reach modes of phase transitions including at the expense of initial power potentials of the processed media. These technologies were also based on the transfer of media to unbalanced states, and the effects of processing were associated with the formation of the vapor phase of the liquid component, the destruction of cell membranes and the accelerated release of the liquid phase.

## ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ

**О. Ю. Шевченко, А. І. Соколенко, І. Ф. Максименко, К. В. Васильківський**  
*Національний університет харчових технологій*

*У статті проаналізовано особливості існування термодинамічних систем в станах рівноваги і в режимах перехідних процесів, які в значній кількості випадків відповідають фазовим переходам першого роду.*

*Показано, що вхідні матеріальні потоки основної сировини і потоки додаткового забезпечення відповідними матеріальними ресурсами одночасно є носіями енергетичних потенціалів, які мають бути максимально збережені і представлені у продукції підприємств. Трансформації цих внутрішніх потенціалів відбуваються, зокрема, і під дією зовнішніх енергетичних потоків.*

*Оцінки внутрішньої енергії систем у формах переходу від однієї системи до іншої поділяються на дві групи. До першої входить форма переходу руху шляхом теплопровідності, а мірою руху є теплота. Загальною мірою у другій групі передавання руху є робота.*

*Стабілізація тиску в системі в режимі фазового переходу означає стабілізацію температури за здійснення процесів конденсації або випаровування, що дає змогу стабілізувати процеси енергообміну як у напрямку введення теплоти в систему, так і, навпаки, виведення з неї.*

*Інтенсивність перебігу фазових переходів визначається значеннями рушійних факторів у формі перепадів температур, концентрацій, тисків, особливих умов. У спеціальних дискретно-імпульсних технологіях вирішальне значення має глибина входження (введення) середовища до незрівноваженого стану і швидкість примусового переведення до нього.*

*Технології вакуумної обробки ягідної, плодової і овочевої продукції забезпечують досягнення режимів фазових переходів, зокрема і за рахунок початкових енергетичних потенціалів оброблюваних середовищ. В основі цих технологій також лежить переведення середовищ до незрівноважених станів, а ефекти обробки пов'язані з утворенням парової фази рідинної компоненти, руйнуванням клітинних оболонок і прискореним виділенням рідинної фази.*

**Ключові слова:** *фазовий перехід, тиск, рівноважний стан, вакуум, термодинаміка, енергообмін, принцип Ле Шательє.*

**Постановка проблеми.** Фізичні прояви вакуумування рідинних, вологонасичених середовищ або середовищ з іншими зрідженими фазами речовин відгукуються на різкі зміни тисків на рівнях, які можуть відповідати фазовим переходам. У сучасних дослідженнях робляться спроби досягнення впливів на хімічний склад кленового соку та сиропу (Lagacé та ін., 2019) за рахунок вакуумування, поєднання ультразвукової та НВЧ-обробки з вакуумним смаженням скибочок фруктів (Faruq, Zhang & Adhikari, 2019), використання технології вакуумної дистиляції при екстрагуванні ефірних масел (Wu та ін., 2019). Позитивні результати досягнуто в технологіях обробки сировини рослинного походження на основі застосування імпульсних електричних полів з мікрохвильовим вакуумним сушінням (Nowaska та ін., 2019).

Концентрація апельсинового соку потребує відповідних енергетичних витрат, що приводять до необхідності сполучення процесів омичного нагрівання з вакуумуванням (Darvishi, Mohammadi, Fadavi, Saba & Behroozi-Khazaei, 2019). Ультразвукове сушіння нектарину, поєднане з вакуумуванням, показало перспективи щодо зниження сукупності енергетичних витрат і підвищення якісних показників продукції.

Пошуки поглиблених впливів стосуються поєднання вакуумування, вібрацій, інфрачервоних впливів за сушіння *Cissus quadrangularis Linn.* (Thanimkarn, Cheevitsopon & Jongyingcharoen, 2019) з досягненням термічної рекуперації.

У (Zhu, Geng & Sun, 2019) зазначається, що імпульсно-вакуумні технології в процесях засолки рибної продукції активно впливають на перебіг процесів. При вирішенні важливих завдань швидкоплинного охолодження середовищ вакуумування є перспективним чинником (Martins, Chada & Pena, 2019). Інтенсифікація випаровування шляхом декомпресії до вакууму (Nader & Louka, 2018) використана для відновлення й текстурування частково знежиреного арахісу.

Високий рівень точності регулювання рівнів енергетичних впливів за рахунок вакуумування є значною перевагою технологій на цій основі (Belkova та ін., 2018; Deng, Chen, Tian, Miao & Zheng, 2019). Поширення інформації щодо перспектив використання імпульсних змін тисків у середовищах харчових виробництв потребує більш глибокого вивчення особливостей перебігу перехідних процесів та їх фізичного й термодинамічного підґрунтя. В основу цих організованих явищ покладаються можливості переведення середовищ до незрівноважених станів за рахунок створення перепадів рушійних факторів і факторів опору як прояв принципу Ле Шательє.

**Мета дослідження:** пошук перспективних напрямків використання вакуумних технологій з досягненням потенціалів внутрішніх енергетичних і матеріальних ресурсів при переробці сировинних потоків харчових виробництв.

**Матеріали і методи.** В основі дослідження — класичні положення технічної термодинаміки, особливості перебігу фазових переходів та їх енергетичного супроводження.

**Викладення основних результатів дослідження.** Перебування будь-якої системи у стані рівноваги означає, що сукупність термодинамічних, механічних або хімічних параметрів, які їй притаманні, у часі не змінюється. Такими є, наприклад, однорідні газові або рідинні середовища з однаковими параметрами тиску й температури в усіх частинах.

Якщо системою вважати сукупність компонентів у ній, то більшість середовищ харчових технологій підпадають під це визначення. Виведення будь-якої системи із стану рівноваги означає наявність зовнішнього механічного, теплового або іншого втручання. При цьому виконання технологічних перетворень узгоджується із зовнішніми впливами для досягнення заданих напрямків реакції системи.

Відомо, що дії таких факторів впливу, як тиск, концентрація компонента й температура, як і будь-яких інших на систему, що знаходиться у стані рівноваги, відображує принцип Ле Шательє-Брауна у відомому формулюванні, за яким

прояв зовнішньої дії супроводжується самопливним процесом, що компенсує такий вплив.

Речовини за певних змін та співвідношень тисків і температур можуть переходити з одного агрегатного стану в інший. Такі трансформації, що відбуваються за сталих температур, відповідають фазовим переходам першого роду. Кількість теплоти, яку речовина отримує із зовнішнього середовища або віддає йому в такому процесі, відповідає прихованій теплоті фазового переходу.

Фазові переходи супроводжуються змінами густини речовини, термодинамічних потенціалів, ентропій у стрибкоподібній формі. До прикладів відносяться випаровування, конденсація, плавлення, кристалізація, поліморфні перетворення тощо.

Якщо в умовах гетерогенної системи відсутні хімічні взаємодії, а можливими є лише фазові переходи за сталих показників температури і тиску, то вона перебуває в стані фазової рівноваги. Остання характеризується певним числом фаз, компонентів і числом ступенів термодинамічної вільності системи. При цьому компонентом є фізично однорідна складова частина, яка може бути видалена з системи та існувати за її межами. Число незалежних компонентів системи визначається різницею між числом компонентів і числом можливих хімічних реакцій між компонентами.

Числу ступенів вільності відповідає число параметрів системи, які можуть бути одночасно довільно змінені в певних межах без зміни числа і природи фаз. За Дж. Гіббсом, число ступенів вільності рівноважної термодинамічної системи  $S$  дорівнює числу незалежних компонентів системи  $K$  мінус число фаз  $\Phi$  плюс число зовнішніх факторів впливу.

Для системи із зовнішніми факторами впливу тільки температури й тиску запишемо:

$$C = K - \Phi + 2. \quad (1)$$

Класифікація системи здійснюється за числом компонентів (одно-, двокомпонентної тощо), числом фаз (одно-, двофазні тощо) і числом ступенів вільності (інваріантні, моно-, двоваріантні тощо). В оцінках систем з фазовими переходами використовуються графічні залежності стану системи залежно від зовнішніх умов (діаграми стану). Аналіз діаграм стану дає змогу визначити число фаз у системі, межі їх існування і характер взаємодій компонентів. В основі аналізу мають місце принципи неперервності та принцип відповідності.

Відповідно до принципу неперервності за неперервних змін параметрів стану всі властивості окремих фаз змінюються також неперервно до тих пір, поки не зміниться число фаз або природа фаз у системі, що призводить до стрибкоподібних змін властивостей системи.

У дослідженнях впливів фазових переходів на системи перспективною є оцінка змін параметрів за змін зовнішніх умов. Повернувшись до рівняння Клапейрона-Клаузіуса, запишемо його у формі:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{r_{\phi,п}}{T_{\phi,п} \cdot \Delta V_{\phi,п}}, \quad (2)$$

де  $\Delta V_{\text{ф.п}} = V_2 - V_1$  — зміна молярного об'єму речовини за фазового переходу (при цьому  $V_2$  відноситься до стану, перехід до якого супроводжується поглинанням теплоти);  $r_{\text{ф.п}}$  — теплота фазового переходу.

Оскільки молярний об'єм пари набагато більший за молярний об'єм тієї ж речовини в рідинному або твердому стані ( $V_{\text{п}} \gg V_{\text{р}}; V_{\text{п}} \gg V_{\text{т}}$ ), то умова (2) набуває такого вигляду для окремих випадків випаровування і перегонки:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{r_{\text{ф.п}}}{T_{\text{ф.п}} V_{\text{г}}} \quad (3)$$

Для багатьох речовин теплота пароутворення або перегонки в значному інтервалі температур стала, що дає змогу умову (3) проінтегрувати:

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \frac{r_{\text{ф.п}}}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right), \quad (4)$$

де  $R$  — універсальна газова стала, кДж/(кг·К).

Оскільки густина води більша за густина льоду, то плавлення останнього супроводжується зменшенням об'єму ( $\Delta V < 0$ ). Звідси випливає, що збільшення тиску знижує температуру фазового переходу «тверде тіло — рідина». Окрім води, ця особливість також стосується вісмуту, через що вони отримали назву «аномальних» речовин.

Як зазначалося, вакуумування рідинних фаз або середовищ з наявністю вологи приводить до порушення умови рівноважного стану. Розглянемо умови термодинамічних трансформацій систем, рідинна фаза яких до вакуумування знаходилася в стані рівноваги за відомих значень початкового тиску  $P_{(н)}$  і початкової температури  $t_{(н)}$ .

Енергетичний потенціал такої системи складає значення:

$$E_{(н)} = m_{(н)} ct_{(н)}, \text{ кДж}, \quad (5)$$

де  $m_{(н)}$  — початкова маса рідинної фази. Надалі враховуємо її як одиничну масу.

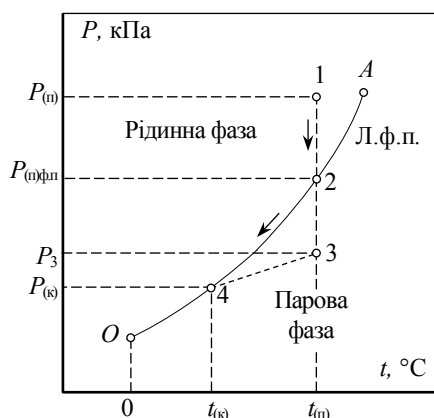


Рис. 1. Діаграма стану рідинної фази середовища в процесі фазового переходу:

Р.ф. — зона рідинної фази; Л.ф.п. — лінія фазового переходу;  $P_{(н)ф.п}$  — початковий тиск фазового переходу

Аналіз до діаграми стану рідинної фази (рис. 1) підтвердив, що в результаті вакуумування і зниження тиску досягається режим фазового переходу. Динаміка зниження тиску в системі може бути різною за ізотермою 1—2 до значення початкового тиску фазового переходу  $P_{(n)ф.п.}$ , однак швидкоплинне зниження за значення  $P_{(n)ф.п}$  означає більш глибоке входження системи до нерівноважного стану і більш інтенсивний перебіг фазового переходу.

Стабілізація кінцевого тиску  $P_{(к)}$  означає досягнення кінцевої температури  $t_{(к)}$  і перехід системи до нового стану термодинамічної рівноваги. Наявність сукупності даних  $P_{(к)}$  і  $t_{(к)}$  дає змогу визначити кінцевий енергетичний потенціал середовища:

$$E_{(к)} = m_{(n)} ct_{(к)}, \text{ кДж}, \quad (6)$$

а різниця значень  $\Delta E$  визначає величину енергетичного імпульсу, що мав місце в організованому режимі переходу:

$$\Delta E = E_{(n)} - E_{(к)} = m_{(n)} ct_{(n)} - m_{(n)} ct_{(к)}, \text{ кДж}. \quad (7)$$

Надалі вважаємо за можливе системі залишатися у вакуумованому стані або здійснювати перехід до початкового тиску  $P_{(n)}$ . При цьому той чи інший вибір величину енергетичного впливу не змінює.

Звернемося до числового прикладу зазначених трансформацій за таких значень:  $P_{(n)} = 0,1 \text{ Мпа}$ ,  $t_{(n)} = 50^\circ\text{C}$  з оцінкою значень енергетичних імпульсів, що відповідають кінцевим тискам  $P_{(к)}$  і відповідним температурам  $t_{(к)}$ . Тоді початковий енергетичний потенціал складає:

$$E_{(к)} = 1,0 \cdot 4,19 \cdot 50 = 209,5, \text{ кДж/кг}. \quad (8)$$

*Таблиця. Результати розрахунків з визначення енергетичних імпульсів*

$P_{(к)}/t_{(к)}$	0,012	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001
	49,5	47,7	45,83	43,8	41,5	39,0	36,2	32,9	28,5	22,1	14,9	6,98
$E'_{(к)}$ , кДж	206,94	199,68	191,84	183,28	173,87	163,38	151,50	137,77	121,40	101,0	73,45	29,33
$\Delta E$ , кДж	0,0	7,3	15,1	23,7	33,1	43,6	55,4	69,2	85,5	105,9	147,0	199,9
$\Delta m_{(к)}$	0,0	0,003	0,0063	0,009	0,013	0,018	0,023	0,029	0,035	0,044	0,058	0,082

Значення  $E'_{(к)}$  в таблиці записано без урахування зниження кінцевої маси  $m_{(к)}$ , хоча воно наявне в системі. Для такого обчислення  $\Delta m_{(к)}$  скористаємося залежністю:

$$\Delta m_{(к)} = \frac{2\Delta E}{r_{(п)} + r_{(к)}}, \text{ кг} \quad (9)$$

де  $r_{(п)}$  і  $r_{(к)}$  — відповідне початкове і кінцеве значення теплоти фазового переходу в перебігу процесу.

За планового зниження тиску в системі по ізотермі 1—2 (рис. 2) до значення  $P_{(n)ф.п}$  розпочинається зниження температури. Утворення парової фази може відбуватися на рівні повнооб'ємної швидкоплинної події за умови обмеженого гідростатичного тиску. Повисотна депресія за показником гідростатичного тиску в якійсь мірі нівелюється різницею тисків  $P_3 - P_2$ . Взаємодія генерованої парової фази з рідиною визначає загальний рівень гідродинамічного стану середовища, інтенсивність якого залежить, зокрема, і від часу перебігу процесу. За наявності у середовищі твердої фази клітинної структури (ягоди, фрагменти фруктів, овочів

тощо) утворення пари супроводжується руйнуванням оболонок клітинних структур з активним виділенням їх внутрішніх компонентів на користь технологічної обробки середовища на наступних етапах.

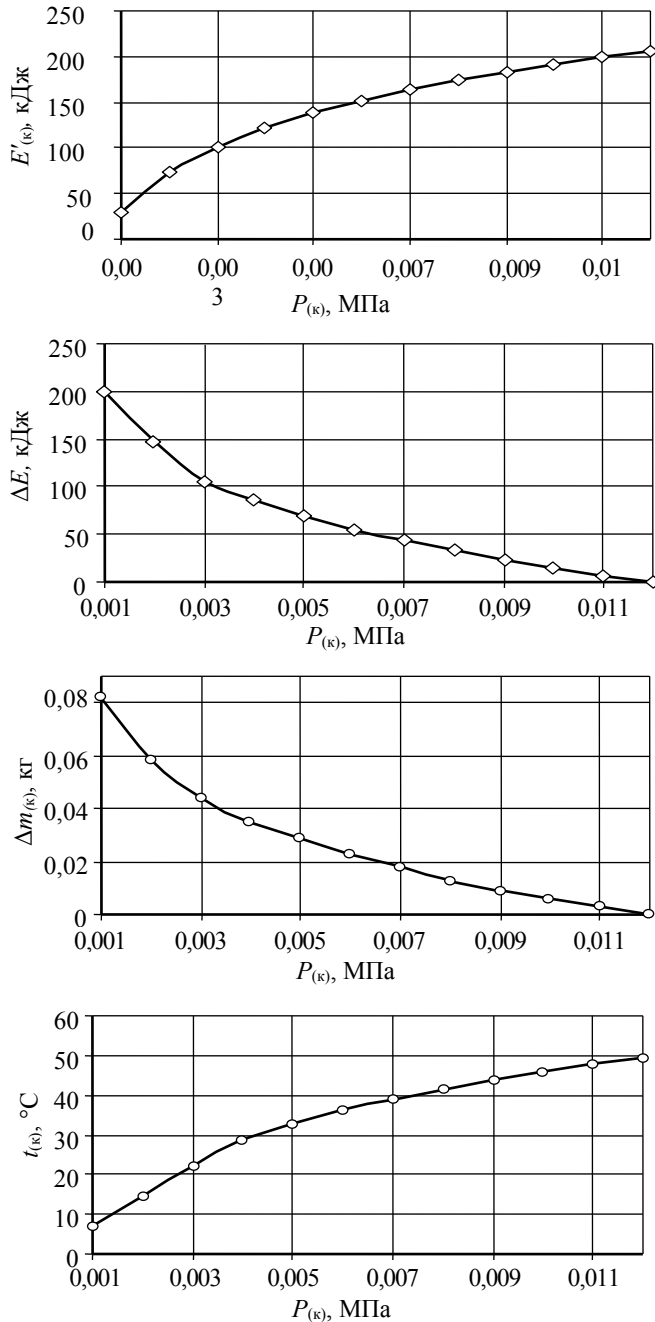


Рис. 2. Графічне представлення залежності термодинамічних параметрів від кінцевого тиску в умовах фазових переходів

Супровід будь-якої технології в пошуках впливів на перероблювані середовища супроводжується оцінкою потужностей енергетичних імпульсів. За результатами, наведеними в таблиці, маємо змогу оцінити значення  $\Delta E$  у вибраному діапазоні параметрів, які наближені до значень у реальних технологіях. Якщо мати можливість визначення часу  $\tau$  активного перебігу процесу, то це відкриває перспективи оцінок потужностей.

У досліджах авторів у широкому діапазоні змін початкових і кінцевих термодинамічних параметрів час перехідних процесів вкладався у межі 5...10 с. Це означало за значень  $\Delta E = 40...50$  кДж/кг досягнення потужностей у межах  $\Delta E/dt$  від 4,0...5,0 до 8,0...10 кВт/кг.

При цьому навіть за нижчих показників  $\Delta E/dt$  одержуємо ситуацію доцільної енергетичної трансформації внутрішніх теплових потенціалів середовищ, які можна порівняти хіба що з потужностями технологій надвисокочастотної обробки в режимах нагрівання рідинних або вологовмісних систем.

Повернувшись до записаних вище умов, одержуємо:

$$\Delta E = (m_{(п)} - m_{(к)})c\Delta t; \quad m_{(к)} = m_{(п)} - \Delta m_{(к)};$$

$$\Delta m_{(к)} = \frac{2\Delta E}{r_{(п)} + r_{(к)}}; \quad (10)$$

$$\Delta E = m_{(п)}ct_{(п)} - m_{(п)}ct_{(к)} + \frac{2\Delta E}{r_{(п)} + r_{(к)}}ct_{(к)};$$

$$\Delta E = m_{(п)}c \left( t_{(п)} - t_{(к)} \right) \left/ \left( 1 - \frac{2ct_{(к)}}{r_{(п)} + r_{(к)}} \right) \right. . \quad (11)$$

Отже, енергетичний імпульс трансформації середовища в режимі вакуумування залежить від значень початкової і кінцевої температур і питомих значень теплоти фазових переходів у середньому обчисленні, оскільки остання пов'язана зі значеннями тисків.

Збільшення тиску в середовищі рідинної фази в ізотермічному процесі ситуацію щодо енергетичного потенціалу не змінює. Водночас збільшення початкової температури в ізобаричному або в якомусь іншому процесі загальний потенціал впливу нарощує, що може супроводжувати спеціальні технології. До останніх віднесемо розробки за патентами України 25944 і 84986, які стосуються способу одержання соків при переробці плодів та ягід. В класичній організації цих технологій важливим недоліком є обмежений вихід соку на рівні 40...80% за загального його вмісту близько 95%. Такий результат пов'язується з необхідністю обмеження тисків пресування через руйнування шкірки і кісточок плодів та ягід з переходом поліфенольних, дубильних і пектинових речовин до соку. Останнє приводить до зміни хімічного складу, погіршення умов освітлення, смакових якостей, помутніння в процесах зберігання. Окрім того, підвищені температури бланшування приводять до руйнування вітамінних комплексів. Обмеження цих недоліків наведено у формулах винаходів вищевказаних патентів у редакції: «Спосіб одержання соків при переробці плодів та ягід, що включає подрібнення, бланшування,



пресування маси та освітлення соків, який відрізняється тим, що подрібнену масу після нагрівання до температур 40...42°C в режимі безперервного транспортування подають у герметичну вакуумну камеру з тиском 0,03...0,005 МПа з досягненням температури адиабатного кипіння рідинної фракції матеріалу з утворенням парової фази».

Швидкоплинне генерування парової фази стосується міжклітинних об'ємів і клітинних структур та супроводжується активним руйнуванням останніх, що приводить до покращення умов пресування й освітлення соків.

Логічне продовження розвитку технологій вакуумних енергетичних імпульсних впливів знайшло у способі одержання цукрових сиропів і аналогів цукатів, що відображено у патенті України 90732 з такою формулою винаходу: «Спосіб одержання цукрових сиропів і аналогів цукатів, що включає подрібнення і пересипку подрібненої маси ягід, фруктів і овочів цукром з доведенням концентрації сухих речовин від 60 до 90%, який відрізняється тим, що подрібнену масу фасують у тару, вакуумують і герметизують за рівня залишкового тиску в тарі 0,005...0,01 МПа та витримують для здійснення осмомолекулярної дифузії». Відмітимо, що в цій ситуації реалізується потрійний вплив на систему, який започатковується енергетичним імпульсом, що трансформується в деструкційно-механічний вплив генерованої пари і, нарешті, осмомолекулярною дифузиею. Вибір різновиду тари у формі жорсткої, напівжорсткої або з плівкових гнучких матеріалів приводить до додаткових впливів. Так, жорстка вакуумна упаковка забезпечує в певному часі початковий залишковий тиск, який поступово буде обмежуватися утворюваною парою рідинної фази. Напівжорстка упаковка з гнучкого плівкового матеріалу після завершення процесу вакуумування підлягає дії атмосферного тиску, тобто силовому стисканню з ознаками створення об'ємних напружених станів. Подовжена у часі, така дія відповідає механічному пресуванню вмісту упаковки на покращення загального результату. Вона має форму розподіленого навантаження, результуюча якої визначається добутком тиску на проекцію криволінійної або іншої поверхні.

### Висновки

Аналіз особливостей існування термодинамічних систем в станах рівноваги і в режимах перехідних процесів, які в значній кількості випадків відповідають фазовим переходам першого роду, дає змогу зазначити, що:

1. Вивчення особливостей і побудови систем, що відповідають харчовим і мікробіологічним середовищам, потребує врахування сучасної інформації щодо властивостей вхідних матеріальних потоків, очікуваних енергетичних ефектів і потреб, можливостей і способів інтенсифікації перебігу процесів.

2. Вхідні матеріальні потоки основної сировини і потоки додаткового забезпечення відповідними матеріальними ресурсами одночасно є носіями енергетичних потенціалів, які мають бути максимально збережені і представлені у продукції підприємств. Трансформації цих внутрішніх потенціалів відбуваються, зокрема, і під дією зовнішніх енергетичних потоків. Узагальнені статистичні дані підтверджують, що кожен кілоджоуль енергетичного потенціалу продукції на виході з системи супроводжується 10 кілоджоулями затрат зовнішньої енергії.

3. Енергетичні ефекти супроводжують різні фізичні та хімічні процеси, тому їх результати залежать від умов їхнього перебігу.

4. Оцінки внутрішньої енергії систем у формах переходу від одної системи до іншої розподіляються на дві групи. До першої входить форма переходу руху шляхом теплопровідності, а мірою руху є теплота. Загальною мірою у другій групі передавання руху є робота.

5. В умовах фазових переходів ентропії систем залишаються сталими.

6. Вибір параметрів системи, за яких вона є двофазною, має широке застосування в більшості технологій. Пояснення такого вибору стосується відносної простоти їх реалізації. Так, наприклад, за атмосферного тиску фазовому переходу води відповідає температури 100°C, аміаку — 33,4, бутану — 0,5, діоксиду вуглецю — 78,2, хладону R12 — 29,8, хладону R13 — 81,5, хладону R22 — 40,84°C.

7. Стабілізація тиску в системі в режимі фазового переходу означає стабілізацію температури за здійснення процесів конденсації або випаровування, що дає змогу стабілізувати процеси енергообміну як у напрямку введення теплоти в систему, так і, навпаки, виведення з неї.

8. Інтенсивність перебігу фазових переходів визначається значеннями рушійних факторів у формі перепадів температур, концентрацій, тисків, особливих умов. У спеціальних дискретно-імпульсних технологіях вирішальне значення має глибина входження (введення) середовища до незрівноваженого стану і швидкість примусового переведення до нього.

9. Варіації різних сполучень тисків і температур фазових переходів використовуються для прискорених або, навпаки, сповільнених режимів теплової обробки. До числа прикладів віднесемо екструдерні технології, швидкісні режими розварювання крохмалевмісної сировини, технології швидкісної високотемпературної стерилізаційної обробки, вакуумні технології тощо.

10. Технології вакуумної обробки ягідної, плодової і овочевої продукції дають змогу досягати режимів фазових переходів, зокрема за рахунок початкових енергетичних потенціалів оброблюваних середовищ. В основу цих технологій також покладається переведення оброблюваних середовищ до незрівноважених станів, а ефекти обробки пов'язані з утворенням парової фази рідинної компоненти, руйнуванням клітинних оболонок і прискореним виділенням рідинної фази.

11. Поширеним різновидом фазових переходів є той, що стосується газонасичених рідин і середовищ.

З деякою умовністю закономірності фазових переходів у класичному розумінні можуть бути перенесені на них на основі закону Генрі, оскільки саме відповідно до нього розчинність газів визначається температурою і тиском. Однак принципова відмінність від класичних фазових переходів полягає в різноспрямованості, оскільки розчинність газів зростає зі зниженням температури в системі і зі зростанням парціального тиску. Різна питома величина розчинності пояснюється фізичними властивостями компонентів системи.

### **Література**

Lagacé L., Camara M., Martin N., Ali F., Houde J., Corriveau S., Sadiki M. (2019). Effect of the new high vacuum technology on the chemical composition of maple sap and syrup, *Heliyon*, 5(6). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01786>.

Faruq A., Zhang M., Adhikari B. (2019). A novel vacuum frying technology of apple slices combined with ultrasound and microwave, *Ultrasonics Sonochemistry*, 52, 522—529. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.033>.

Wu Z., Xie L., Li Y., Wang Y., Wang X., Wan N., Huang X., Zhang X., Yang M. (2019). A novel application of the vacuum distillation technology in extracting *Origanum vulgare* L. essential oils, *Industrial Crops and Products*, 139(1). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111516>.

Nowacka M., Wiktor A., Anuszevska A., Dadan M., Rybak K., Witrowa-Rajchert D. (2019). The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks, *Ultrasonics Sonochemistry*, 56, 1—13. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023>.

Darvishi H., Mohammadi P., Fadavi A., Saba M. K., Behrooz-Khazaei N. (2019). Quality preservation of orange concentrate by using hybrid ohmic – Vacuum heating, *Food Chemistry*, 289, 292—298. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.043>.

Thanimkarn S., Cheevitsopon E., Jongyingcharoen J. S. (2019). Effects of vibration, vacuum, and material thickness on infrared drying of *Cissus quadrangularis* Linn, *Heliyon*, 5(6). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01999>.

Zhu Z., Geng Y., Sun D. (2019). Effects of operation processes and conditions on enhancing performances of vacuum cooling of foods: A review, *Trends in Food Science & Technology*, 85, 67—77. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.011>.

Martins M. G., Chada P., Pena R. S. (2019). Application of pulsed-vacuum on the salt impregnation process of pirarucu fillet, *Food Research International*, 120, 407—414. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.03.016>.

Nader J., Louka N. (2018). Development of a novel technology entitled “Intensification of Vaporization by Decompression to the Vacuum” (IVDV) for reconstitution and texturing of partially defatted peanuts, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 45, 455—466. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.015>.

Belkova B., Hradecky J., Hurkova K., Forstova V., Vaclavik L., Hajslova J. (2018). Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil, *Food Chemistry*, 241, 51—59. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.062>.

Deng K., Chen J., Tian Y., Miao S., Zheng B. (2019). Optimization of process variables on physical and sensory attributes of shiitake (*Lentinula edodes*) slices during vacuum frying, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 54, 162—171. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.04.009>.