

А.І. СОКОЛЕНКО, доктор технічних наук
К.В. ВАСИЛЬКІВСЬКИЙ, кандидат технічних наук
Ю.О. СТУПАК
 Національний університет харчових технологій
О.М. СЕМЕНОВ
 Подільський державний аграрно-технічний університет

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ РОТАЦІЙНІЙ СТЕРИЛІЗАЦІЇ

Запропоновано аналітичний апарат щодо оцінки силових впливів для ротаційних стерилізаційних апаратів. Знайдено можливість інтенсифікації тепло- та масообмінних процесів за рахунок використання потенціальних полів сил тяжіння, інерції та відцентрових сил.

Ключові слова: інтенсифікація, сила тяжіння, сила інерції, відцентрова сила.

Предложен аналитический аппарат для оценки силовых факторов для ротационных стерилизаторов. Найдена возможность интенсификации тепло- и массообменных процессов за счет использования потенциальных полей сил тяжести, инерции и центробежных сил.

Ключевые слова: интенсификация, сила тяжести, сила инерции, центробежная сила.

У технологіях теплової пастеризаційної та стерилізаційної обробки витрати часу на процес в цілому пов'язані з часом нагрівання до заданої температури, витримки при заданій температурі та з часом охолодження.

Числові значення часу нагрівання і охолодження продукції у цих схемах наведені у відповідних формулах пастеризації та стерилізації [1, 2]. Очевидно, що зі зростанням об'ємів упаковок зростає час нагрівання і охолодження продукції. Особливо подовженими ці процеси є для консистентної продукції, для якої обмеженням або навіть відсутнім є конвективний теплообмін. У таких умовах нагрівання продукції в упаковці здійснюється в основному за рахунок теплопровідності. Це ж саме відноситься і до охолодження упаковок після завершення пастеризації та стерилізації [3].

Підвищення швидкості цих перехідних процесів має вирішальне значення, тим більше, що воно важливе не тільки з точки зору продуктивності технологічного обладнання, а і з точки зору якісних показників продукції. Якщо самою технологією ведення про-

цесів можливо обмежити час нагрівання герметизованої упаковки за рахунок фасування гарячої продукції, нагрівання якої може бути суттєво прискореним, то в процесах охолодження для консистентної продукції єдиним і лімітуючим є процес передавання теплоти теплопровідністю.

Вказані особливості знаходять своє відображення в спеціальних конструктивних рішеннях пристроїв, які одержали назву ротоматів. На процеси, що мають місце при обертанні упаковки накладаються переміщення газової фази. У зв'язку з цим має значення орієнтація площини обертання. Так за горизонтальної орієнтації вплив інерційної складової і сил тяжіння стабілізується (рис. 1).



Рис. 1. Схема до визначення силових факторів при обертанні ротора з упаковками

Величина результуючої сил інерції і сил тяжіння при цьому буде складати:

$$P_{\text{рез}} = \sqrt{P_i^2 + (mg)^2} = \sqrt{m^2 \omega^4 r^2 + m^2 g^2} = m \sqrt{(\omega^2 r)^2 + g^2}.$$

Поверхня поділу фаз (рідинної і газової) за таких умов прийме форму частини параболоїда, а форма продукту в упаковці залишається стабілізованою без ознак механічного перемішування, якщо кутова швидкість ω і радіус обертання r залишаються незмінними.

Дестабілізація об'єму продукту можлива лише за рахунок зміни величини і напрямку результуючої сил інерції. Такій умові відповідає наявність кутового прискорення ε ротора, тобто $\omega \neq \text{const}$. При цьому повне прискорення упаковки складатиметься з нормальної і тангенціальної складових

$$\vec{a} = \vec{a}^n + \vec{a}^t = \omega^2 \vec{r} + \varepsilon \vec{r}.$$

Очевидно, що в останній умові кутова швидкість ω може задаватися як функція часу (або кута повороту). Тоді, наприклад,

$$\omega = \omega(\tau); \quad \varepsilon = \frac{d\omega(\tau)}{d\tau}.$$

Якщо в обертанні ротора передбачити зупинки, то це означатиме наявність перехідних режимів, коли сила інерції зникає, залишається лише вплив сили тяжіння, відбувається перерозподіл продукту в упаковці, а від початку руху генерується потенціальне поле сил інерції, що змушує продукт до нового переорієнтування в режимі активного перемішування. На рис. 2 наведено діаграми, якими представлено залежності $\varepsilon = \varepsilon(\tau)$; $\omega = \omega(\tau)$ і $\varphi = \varphi(\tau)$. При цьому час одного циклу складає величину $\tau_{\text{ц}}$ і в нього входить час робочого ходу τ_p і час вистою τ_v

$$\tau_{\text{ц}} = \tau_p + \tau_v,$$

що відображено на рисунку.

В свою чергу час робочого ходу розбиваємо на дві частини, а саме на час розгону $\tau_{p,p}$ і гальмування $\tau_{p,r}$

$$\tau_p = \tau_{p,p} + \tau_{p,r}.$$

Закон, що відповідає залежності $\varepsilon = \varepsilon(t)$ на ділянці розгону $\tau_{p,p}$ називається рівноприскоренням, а на ділянці $\tau_{p,r}$ — рівносповільненням. В позиціях 0, 1, 2, 3, 4, 5... має місце миттєва зміна кутового прискорення ланки, що відповідає м'яким ударам. При цьому кутова швидкість змінюється за лінійним законом, а кутове переміщення — за параболічним.

Тоді повне прискорення упаковки

$$a = \sqrt{(a^t)^2 + (a^n)^2} = \sqrt{(\varepsilon r)^2 + (\omega^2 r)^2},$$

а сила інерції, що діє на продукт

$$P_i = ma = m \sqrt{(\varepsilon r)^2 + (\omega^2 r)^2}.$$

Як бачимо, кінематичне збурення стосується змінної кутової швидкості, що супроводжується зміною сили інерції як за величиною, так і за напрямком. Зміна напрямку P_i визначається зростанням або зменшенням кутової швидкості ω . Результуюча сил інерції і сил тяжіння у цьому випадку визначається за виразом

$$P_{\text{рез}} = \sqrt{P_i^2 + (mg)^2} = \sqrt{m^2 + (\omega r^2 + (\omega^2 r)^2)}.$$

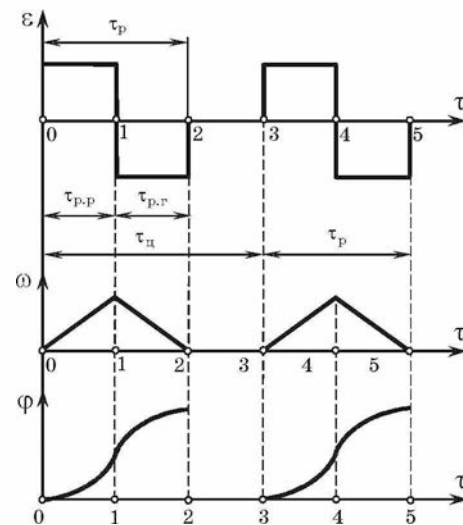


Рис. 2. Кінематичні діаграми переміщення ротора

Отже, інтенсифікація теплообміну ґрунтується на способах інтенсифікації масообміну, що потребує виконання одного з двох варіантів:

сили, що прикладаються до об'єкта змінні за величиною або напрямком;

об'єкт змінює свою орієнтацію в стаціонарному потенціальному силовому полі.

Оскільки до останніх в наших умовах відносяться гравітаційне поле і потенціальне поле сил інерції, то саме на основі цих чинників можливою є зміна гідродинамічних режимів продукції в герметизованій упаковці.

Сили інерції і сили тяжіння об'єднуються поняттям масових сил.

Сили тяжіння відносно просторової системи координат, в якій відбувається перебіг різних технологічних процесів, мають певну орієнтацію, а тому досягти за їх рахунок інтенсифікації гідродинамічного стану, тепло- або масообміну можливо за рахунок зміни координат об'єктів маніпулювання.

Силі впливи на середовище при цьому залежать тільки від фізичних характеристик останнього за стабілізованого потенціалу гравітаційного поля. У зв'язку з відміченим вказані впливи певною мірою обмежені.

Значне нарощування в інтенсифікації рівнів силових впливів, масообміну, гідродинамічних дій тощо лежить на шляху використання потенціальних полів сил інерції.

Розглянемо деякі з випадків, що стосуються обертальних рухів і за рахунок яких створюються відцентрові сили. Нехай об'єкт маніпулювання виконано у вигляді вертикального циліндричного резервуара з можливістю обертання його навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю ω (рис. 3).

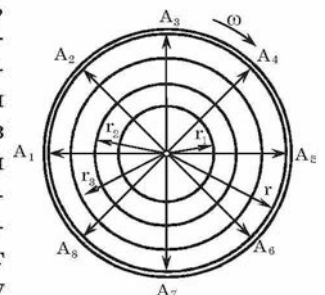


Рис. 3. Схема до визначення структури потенціального поля відцентрових сил інерції

За рахунок сил тертя з оболонкою резервуара та внутрішнього тертя в середовищі або за рахунок вертикальних радіальних перегородок середовище також одержує обертальний рух з кутовою швидкістю, близькою до ω . Результатом такого обертального руху є виникнення додаткового внутрішнього тиску за рахунок відцентрових сил. При цьому за інших рівних умов величини відцентрових сил визначаються відстанню від центра обертання, тобто радіусом-вектором $\vec{r}_i$. Однаковим модулем $|\vec{r}_i|$ відповідають ізопотенціальні кола з радіусами r_1, r_2, r_3 тощо. Очевидно, що за вказаних умов потенціальне поле сил інерції відносно середовища (і оболонки реактора) є стабілізованим і не впливає на його гідродинамічний режим. Проте загальне підвищення тиску в системі у відповідності до закону Генрі збільшує розчинність газів в рідинних середовищах, що дає підстави вважати його фактором інтенсифікації стосовно газорідних систем.



Рис. 4. Схема до випадку асиметричного розташування осі обертання упаковки

Обертання резервуару навколо вертикальної осі O_1 , яка не співпадає з його геометричною віссю (рис. 4), приводить до суттєвої зміни в розташуванні ізобар. У цьому випадку також має місце стабілізоване положення поля сил інерції відносно середовища і з точки зору інтересів інтенсифікації масообміну можливо розраховувати лише на підвищення тиску в системі.

Відгуком систем по рис. 3 та 4 на створення полів

відцентрових сил буде зміна поверхні рідинного середовища. Стосовно випадку по рис. 3 ця поверхня буде мати поверхню параболоїда, а щодо випадку з асиметричним розташуванням осі обертання — частину поверхні параболоїда. Несиметричність останньої відносно упаковки вказує на можливість впливу на гідродинамічний стан об'єму середовища за рахунок надання одночасного з обертанням навколо асиметричної осі O_1 обертання навколо геометричної осі симетрії упаковки з кутовою швидкістю ω_1 . Наслідком такого суміщення двох обертальних рухів буде утворення біжучої хвилі по поверхні рідинної фази з додатковим радіальним і коловим перемішуванням.

Таким чином, за обертання циліндричної упаковки навколо осі симетрії в перехідному режимі, коли кутова швидкість змінюється від нуля до усталеного значення відбувається зміна форми об'єму продукту, тобто має місце перерозподіл маси в радіальному напрямку. Після стабілізації кутової швидкості такий перерозподіл припиняється і форма об'єму продукту стабілізується. За рахунок сил тертя між оболонкою і продуктом відбувається розкручування маси продук-

ту і ефект інтенсифікації теплообміну суттєво знижується. Зупинка ж упаковки або навіть реверсування її напрямку обертання, як перехідні процеси, знову забезпечили б інтенсивний теплообмін. Отже, перехід до кінематики, в якій реалізуються перехідні процеси, є засобом інтенсифікації, що забезпечує позитивний і яскраво виражений результат.

Висновки. Для ротаційних стерилізаційних апаратів горизонтальної орієнтації вплив інерційної складової і сил тяжіння стабілізується. Дестабілізація об'єму продукту можлива лише за рахунок зміни величини і напрямку результуючої сил інерції, яка можлива за наявності кутового прискорення ротора.

Значне нарощування в інтенсифікації рівнів силових впливів, масообміну, гідродинамічних дій тощо лежить на шляху використання потенціальних полів сил інерції, за рахунок відцентрових сил.

ЛІТЕРАТУРА

1. Флауменбаум Б.Л. Основы консервирования пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая пром-сть. — 1982. — 272 с.
2. Бабарин В.П. Стерилизация консервов. С.-П.: ГИОРД. — 2006. — 312 с.
3. Піддубний В.А., Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Васильківський К.В. Інтенсифікація масообміну // Харчова і переробна промисловість. — 2007. — № 2. — С. 18—20.

Одержана редколлегією 10.05.08 р.