

ПАЛАШ А.А., інженер
БУТ С.А., кандидат технічних наук
Національний університет харчових технологій

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛО- І МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

Наведено інформацію щодо методів інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів та сучасного їх забезпечення.

Ключові слова: теплообмін, процеси, інтенсифікація, енергія, підґрунтя, масообмін, імпульс.

Представлено інформацію относительно методов интенсификации тепло- и массообменных процессов и современного их обеспечения.

Ключевые слова: теплообмен, процессы, интенсификация, энергия, основание, массообмен, импульс.

Технології значної кількості виробництв розпочинаються використанням «холодних» вхідних матеріальних потоків і завершуються ще більш охолодженими потоками основної вихідної продукції. Це означає, що температурні зміни матеріальних потоків в процесі їх трансформації відносяться до внутрішньої частини технології і те, що існує теоретична можливість такої ідеальної схеми, в якій енергетичні витрати були б мінімізованими.

Враховуючи дисипативні втрати систем транспортування рідинних і газових потоків, процесів перемішування, механічної обробки тощо слід відмітити майже повну відсутність рекуперації вхідних енергетичних потоків в них не лише в машинному або апаратному оформленні, а у тому числі і спроб оцінити їх на теоретичному рівні. Такий висновок стосується більшості загальних технологій, використовуваних людством. Якщо енергетичну неефективність систем з названими дисипативними характеристиками можливо пояснити існуючими закономірностями пере-

творення різних видів енергії у теплову і навпаки, то рекуперативні перетворення теплових потоків мають високі значення «коефіцієнтів корисної дії» або коефіцієнтів використання.

Відсутність загальнозначних схем раціонального енергокористування і рекуперації теплових потоків у технологіях виробництва, наприклад, пива слід пояснити особливостями процесів, відсутністю безперервних схем і неспівпадінням в часі здійснення процесів з високим енергетичним навантаженням. Вказані обставини формують можливості лише часткового рішення на рівнях локальних зон тепло- і масообміну.

До останніх слід віднести процеси пророщування та сушіння солоду, варіння заторів і пива, охолодження сусле, бродіння і доброжування пива, теплову обробку пива на рівні пастеризації, процеси охолодження об'єктів обробки з використанням холодильних установок.

Особливістю перебігу названих процесів є обмеження, які накладаються на певну частину з них

хімічними і особливо біохімічними складовими. Наприклад, з точки зору інтенсивності пророщування солоду ефективний вплив має температура його перебігу. Однак біохімічні перетворення цілком чітко обмежують рамки температур, вихід за які однозначно спричиняє негативні наслідки, пов'язані з виходом екстракту і якістю готової продукції. У зв'язку з цим стосовно цього процесу заходи по його інтенсифікації обмежуються чіткою вимогою: «термодинамічні параметри мають максимально наближатися до оптимальних».

Таким чином заходи по інтенсивному веденню технології пророщування можуть стосуватися режимів кондиціонування повітря (нагрівання або охолодження), вологонасичення, рекуперативного повернення частини повітря, видалення CO_2 з рекуперованого повітря, забезпечення рівномірного розподілу повітря по зерновому масиву, забезпечення обмежень по температурним градієнтам тощо. Стосовно названих процесів слід відмітити можливість і доцільність їх раціонального здійснення в рамках обмежень часу, що відповідають головній технології. Тим не менш створення інтенсивних засобів впливу на кожен з процесів, по-перше, створює ресурси підвищення пропускної здатності системи, а, по-друге, дозволяє варіювати різними параметрами і досягати номінальних показників перебігу основних процесів. Збільшення швидкостей їх здійснення дає можливість зменшення енерго- і матеріалоемкості обладнання, що і визначається як головна задача проектувальників і конструкторів.

Для вирішення подібних задач використовуються різні фізико-хімічні або термодинамічні ефекти і явища як на основі досягнень науково-технічного прогресу, так і за використання нових технологічних підходів. До числа сучасних перспективних методів інтенсифікації сукупності процесів харчових технологій відносять концентровані енергетичні впливи з використанням фізичних і хімічних ефектів, в яких застосовуються зовнішні джерела енергії.

Вибір на користь того чи іншого варіанта інтенсифікації повинен враховувати допуск у впливах на якісні показники конкретних локальних і загальних результатів всієї сукупності технологій. Найкращою слід вважати ситуацію, за якої інтенсифікація процесів супроводжується покращенням показників якості [1].

Наявність математичних моделей процесів або хоча б принципів їх створення слід розглядати як перший крок, що часто ґрунтується на основі лінійних кінетичних рівнянь, які в значній кількості випадків не охоплюють всю багатогранність і складність явищ тепло- та масоперенесення [2—4].

Лінійні закони перенесення типу

$$\frac{dM}{dt} = kSF,$$

де k — коефіцієнт швидкості технологічного процесу; S — площа; F — рушійна сила процесу можуть бути використані для аналізу процесу інтенсифікації в пе-

редбаченні про незначне відхилення процесу від стану термодинамічної рівноваги і малості градієнтів потенціалів перенесення. Для аналізу нелінійних співвідношень між потоком перенесення і градієнтом відношень між потоком перенесення і градієнтом потенціалу використовуються підходи і принципи термодинаміки незворотних процесів. Стосовно більшості тепломасообмінних процесів в інженерних розрахунках можливо орієнтуватися на пропорційну залежність між параметрами M та S, F і k .

Звичайно для інтенсифікації тепло- та масообмінних процесів використовують перемішування, організацію потоків, зміну гідродинамічних режимів та спеціальні фізичні ефекти тощо [5, 6].

Сучасні підходи, пов'язані з інтенсифікацією тепло- та масообміну в значній частині випадків пов'язують з накладанням на газо- або парорідинні середовища механічних коливань. Генерування останніх доцільно здійснювати на основі дискретно-імпульсних методів енерговведення [5]. Реалізація цього методу передбачає існування або створення газової чи парової фаз, що знаходяться в рідинній, і розсосереджені за якимись законами. Різкому підвищенню тисків в таких системах відповідає стискання бульбашок, а для парових бульбашок воно може завершуватися колапсом. Наслідком останнього є створення імпульсу високого тиску у вигляді сферичної ударної хвилі, або за наявності біля локальної зони кавітації жорсткої поверхні утворюється кумулятивний мікропотік в напрямку до неї.

Процес колапсу може супроводжуватися високо-частотною осциляцією з випромінюванням в рідинну фазу акустичної енергії в ультразвуковому діапазоні.

За швидкого зниження тиску виникає ефект потужного утворення парової фази, що супроводжується генерацією імпульсу тиску значної амплітуди і турбулізацією прилеглих шарів рідинної фази. Наслідком цього в просторі між бульбашками виникають інтенсивні мікротечії з високими миттєвими значеннями локальних швидкостей, прискорень і тисків.

Множину бульбашок в стані динамічного розвитку можливо розглядати як своєрідну сукупність мікро-трансформаторів, що перетворюють акумульовану в системі потенціальну енергію в кінетичну енергію рідини, розташовану дискретно в просторі і часі.

Реалізація методів дискретно-імпульсних впливів має фізичне підґрунтя ударної дії, яке лежить в основі, наприклад, оптичного лазера або вибуху спрямованої дії, коли повільне накопичення енергії завершується швидкоплинним її звільненням або трансформацією. Таким чином, за рахунок обмеженої просторової і часової локалізації досягаються високі значення потужностей в зонах перетворень.

Досягнення помітних результатів в умовах використання дискретно-імпульсних технологій супроводжується виконанням наступних умов:

1. Швидкість трансформування потенціальної енергії в системі повинна перебільшувати швидкість її акумулювання;

2. Подовженість у часі трансформування енергії повинна бути якомога коротшою, оскільки корисна потужність у вигляді імпульса обернено пропорційна часу трансформації і прямопропорційна енергії переходу;

3. Енергія у формі імпульса повинна виділятися одночасно у максимуму об'єму середовища.

Названі умови накладають жорсткі обмеження на швидкість зміни зовнішніх тисків, яка за енергетичної трансформації повинна бути максимально високою. Разом з тим, подовженість трансформування суттєво залежить від властивостей самої системи, її теплофізичних характеристик, режимних параметрів і концентрації бульбашок газової фази.

В роботі [7] пояснюється ефективність пульсаційних методів інтенсифікації масообмінних процесів. Якщо величини, що входять до рівняння масоперенесення

$$X = \{M, \beta, S, C\}$$

визначені сумою посередніх на відрізку часу t складових \bar{X} і відхилень від них ΔX

$$X = \bar{X} + \Delta X(t); \quad \bar{X} = \frac{1}{t} \int \Delta X dt,$$

то осередненням отримуємо

$$\bar{M} = \beta \bar{S} C + \beta (\overline{\Delta S \Delta C}) + S (\overline{\Delta \beta \Delta C}) + C (\overline{\Delta \beta \Delta S}) + (\overline{\Delta \beta \Delta S \Delta C}).$$

Знак риски над параметром (\bar{X} , \bar{M} , $\bar{\beta}$...) означає осереднення по часу; Δ — макровідхилення від середнього значення.

За стаціонарної організації процесу його продуктивність визначається першою складовою правої частини, оскільки всі інші дорівнюють нулю. Пульсаційна форма організації масообміну сприяє перерозподілу і концентрації енергії в просторі і часі, видовій трансформації впливів, підвищенню продуктивності за рахунок формальної пульсаційної організації процесу і сприяє оптимізації концентрації енергії.

Питома енергія і-ої фази і всієї системи визначається 3-ма складовими: внутрішньою енергією u , кінетичною енергією макроруку E_k і кінетичною енергією пульсаційного руху E_n [8]:

$$E = u + E_k + E_n.$$

Тоді для двофазної системи

$$\rho u = \rho_1 u_1 + \rho_2 u_2;$$

$$\rho E_n = \rho_1 E_{n1} + \rho_2 E_{n2};$$

$$\rho E_k = \frac{m}{2} \rho_1 V_1^2 + \frac{m}{2} \rho_2 V_2^2$$

Таким чином, з аналізу останнього рівняння витікає, що загальна питома енергія для відповідної фази і для всієї системи більша для імпульсного потоку, ніж для стаціонарного.

Синергетичні впливи. Синергетичність означає об'єднані дії різних впливів, які супроводжуються новими якісними ефектами. Інтенсифікація хіміко-

технологічних процесів при цьому відбувається за рахунок нелінійних фізико-хімічних ефектів при синергетичних багатофакторних впливах. Саме впливи при цьому можуть бути лінійними, але прискорення досліджуваних процесів відбувається за рахунок нелінійних ефектів другого порядку, наприклад, кавітації, турбулентності, фазових переходів тощо.

Досягнення синергетичних ефектів певним чином корелюється зі структурою впливів і видом масообмінних або фізико-хімічних процесів (таблиці 1—4). При цьому аддитивним ефектам парних взаємодій відповідають процеси і явища, які є характерними для лінійної теорії термодинаміки незворотних процесів. Синергетичні і антагоністичні ефекти відповідають нелінійним процесам, що протікають в оброблюваних середовищах і їх опис ґрунтується на принципах нелінійної термодинаміки незворотних процесів [9].

Таблиця 1

Сумісні результати енергетичних впливів на процеси розчинення

Впливи основні	Додаткові і вторинні впливи					
	A	E	Mг	Mx	T	P
A	+	++	+	+	+	+
E	++	+	+	+	++	+
Mг	+	++	+	+	+	+
Mx	+	+	+	+	+	+
T	+	++	+	+	+	+
P	+	+	+	+	++	+

Таблиця 2

Сумісні результати енергетичних впливів на процеси емульгування

Впливи основні	Додаткові і вторинні впливи					
	A	E	Mг	Mx	T	P
A	+	-	-	++	+	+
E	+	+	-	+	+	+
Mг	+	-	+	+	+	+
Mx	++	-	-	+	+	+
T	+	-	-	+	+	+
P	+	-	-	+	+	+

Таблиця 3

Сумісні результати енергетичних впливів на процеси диспергування

Впливи основні	Додаткові і вторинні впливи					
	A	E	Mг	Mx	T	P
A	+	+	+	+	+	+
E	+	+	+	+	+	+
Mг	+	+	+	+	+	+
Mx	+	+	-	+	+	+
T	+	+	+	+	+	+
P	+	+	+	+	+	+

Таблиця 4

Сумісні результати енергетичних впливів на процеси екстрагування

Впливи основні	Додаткові і вторинні впливи					
	A	E	M _г	M _х	T	P
A	+	++	+	++	+	+
E	++	+	+	+	++	+
M _г	+	+	+	+	+	+
M _х	++	++	+	+	++	+
T	+	+	+	+	+	+
P	+	+	+	+	+	+

Примітка: «++» — синергетичний ефект; «+» — аддитивний ефект; «-» — антагоністичний ефект впливу; A — акустичні; E — електричні; M_г — магнітні; M_х — механічні; T — теплові; P — радіаційні впливи.

Енергетичні впливи передбачають не тільки парні комбінації, а також потрійні і більше. Прогнозованими також є аддитивні ефекти. Для синергетичних і антагоністичних ефектів, у зв'язку з їх нелінійністю аналіз і прогнозування результатів впливів є принципово складним, а кількість варіантів сполучень велика.

Наступним принципом інтенсифікації процесів за імпульсних впливів — концентраційна вибірковість, яка передбачає концентрацію енергії, і час впливу. Значна кількість впливів при цьому реалізується лише в пульсаційній формі. Процеси розчинення, екстракції, кристалізації тощо реалізуються за рахунок дискретного підведення або відведення порції рідини до поверхні поділу фаз, що і відображує принцип дискретності.

Дані, наведені в табл. 4, дають прогностичну оцінку стосовно напрямків досягнення синергетичних ефектів. Відзначаючи корисність такої інформації, тим не менш доцільно вказати на її обмежені можливості.

По-перше, рівень впливів наводиться в якісній формі і як такий, що відповідає двом факторам, наприклад, акустичному і механічному. Очевидно, що пошуки екстремальних ефектів доцільно пов'язати з комплексними наборами більшої кількості факторів. Максимальна їх зазначена кількість відповідає 6-ти і їм міг би відповідати шестифакторний експеримент або інша якась комбінація з числа факторів. При цьому важливо, що сукупність впливу факторів на функцію відгуку мала б і кількісну оцінку.

По-друге, вказівки на можливість досягнення синергетичних ефектів потребують уточнень властивостей і фізичних оцінок перебігу досліджуваних процесів. Наприклад, підвищення температури, як характеристики впливу теплової енергії, швидкість екстракції цільових речовин підвищує, але швидкість розчинення газів в рідинних середовищах зменшує тощо.

Оцінюючи вплив різних факторів на перебіг технологічних процесів, слід зазначити важливу роль не лише початкового потенціалу, а і швидкість його зміни в часі. Стосовно енергетичних показників впливів таким параметром буде потужність. Саме цей показник є відповідальним за ефекти дискретно-імпульсних

технологій. Різновидом останніх слід вважати започатковану в Національному університеті харчових технологій методику впливів, що ґрунтується на потенціальній енергії розчинених газів в рідинних середовищах або вологовмістких продуктах, сировині, напівфабрикатах тощо [10]. Насичення середовищ відбувається за підвищених тисків, а різка розгерметизація об'ємів оброблюваних середовищ, за своїми наслідками еквівалентна адиабатному кипінню в дискретно-імпульсних технологіях.

Висновки. До числа найбільш вагомих заходів щодо інтенсифікації процесів тепло- і масообміну відносяться ті, які ґрунтуються на фазових переходах води або інших речовин. Важливо, що за таких умов парова фаза, як матеріальний потік, одночасно виконує роль ефективного теплоперенесення. Саме на цій основі зростає сфера використання теплових труб і загальних схем теплозабезпечення підприємств.

Енергоспоживання значної кількості харчових підприємств характеризується нерівномірністю вхідних потоків, що викликано як особливостями їх технологій, так і організацією добової діяльності, дискретністю енергоємних процесів, коливаннями добової і сезонної температури тощо. Енергетичний менеджмент з комплексною оцінкою внутрішніх енергетичних потоків виступає підґрунтям логістики використання і трансформації вхідних енергетичних потоків.

Важливою складовою у розвитку технологій ощадливого енергокористування в локальному виконанні є рекуперативне повернення матеріальних потоків, які є носіями теплоти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии: Основы стратегии. — М.: Наука, 1976. — 500 с.
2. Вейник А.В. Термодинамика реальных процессов. — Минск: Наука и техника, 1991. — 576 с.
3. Таганов И.Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. Нелинейные системы. — Л.: Химия, 1979. — 208 с.
4. Адмутари Е.Ф. Новые методы в теплопередаче / Пер. с англ. под ред. А.И. Леонтьева. — М.: Мир, 1977. — 230 с.
5. Федоткин И.М., Жарик Б.Н., Погорельский Б.И. Интенсификация технологических процессов пищевых производств. К.: Техника, 1984. — 176 с.
6. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продуктов. — М.: Пищевая пром-сть, 1974. — 584 с.
7. Долинский А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий // Инженерно физический журнал. — 1996. Т. 69. — С 855—896.
8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — Ч. 1. — 464 с.
9. Химическая энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1995, Т. 4. — 640 с.
10. Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Піддубний В.А. Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових і мікробіологічних технологіях. — К.: — Люксар. — 2008. — 443 с.

Одержана редколлегією 10.06.08 р.