

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ И ПИЩЕВЫХ ОТРАСЛЯХ

Сухенко ю.г., д.т.н., Сухенко в.ю., к.т.н., Бородина в.м., аспиr.,
Хоменко с.в., аспиr.

*(Национальный университет биоресурсов и природопользования
Украины)*

Приведен обзор и анализ способов интенсификации тепломассообменных процессов. Указаны направления исследований, которые могут быть наиболее эффективными. Даны рекомендации по конструированию аппаратов.

Постановка задачи. Поступательное развитие нашей страны во многом определяется успешной работой перерабатывающих и пищевых предприятий. Вместе с тем, по оценкам специалистов, из действующих в настоящее время предприятий этого профиля современным требованиям отвечают лишь 20-30 % [1]. Интенсификация технологических процессов – общепризнанное направление научно-технического прогресса в отрасли.

За последние годы на пищевых и перерабатывающих производствах получили развитие гидродинамические, вибрационно-акустические, магнитные, ионно-радиационные и другие методы ведения процессов, а также внедряются мембранные, кристаллогидратные, электрохимические, суперкавитационные и другие технологии. Научной основой интенсификации технологических процессов пищевых и перерабатывающих производств должно быть установление и использование новых физико-химических эффектов при ведении технологических процессов. Только используя новые конструктивные решения, мощности и технологии, позволяющие уменьшить потери и углубить переработку, можно добиться увеличения объёма выхода готовой продукции из того же количества сырья. Повысить эффективность производства пищевых продуктов из сырья сельскохозяйственных предприятий можно на основе интенсификации технологических процессов, создания и внедрения современного оборудования.

Цель работы: Проанализировать возможные направления

интенсификации тепломассообменных процессов в тесной связи с законами диссипации энергии и оптимизацией энергетических затрат.

Результаты исследований. Наилучшие результаты в повышении эффективности промышленного производства продуктов питания можно получить, объединив новые режимно-технологические и аппаратурно-конструктивные решения. Используя приемы совмещения и оптимизации процессов, создания замкнутых циклов материальных и энергетических потоков, унификации и рационального выбора материалов узлов и агрегатов, повышения в оптимальных пределах единичных мощностей оборудования можно получить существенный технико-экономический эффект. В перерабатывающей и пищевой промышленности широко применяются процессы ректификации, абсорбции, адсорбции, экстракции, растворения, кристаллизации, теплообмена. Общим признаком этих процессов являются системы взаимодействия газ (жидкость) – жидкость (твердое тело). Интенсификация таких процессов достигается, в большинстве случаев, одними и теми же приемами, так как процесс переноса массы и тепла определяется структурой материальных потоков [3,4,5].

Как правило, гидродинамика процессов описывается уравнениями Навье-Стокса. Однако трудности и неточности математического описания не позволяют найти оптимальные параметры процессов массопередачи или теплопередачи и, поэтому, возникает необходимость развития экспериментальных методов исследования и эмпирического подхода к описанию тепломассопередачи [2,3,5].

Интенсификацию гидродинамических процессов преимущественно связывают с развитием турбулентности в потоке. Турбулизация гидродинамических течений является одной из самых трудных задач. И перспективными являются те исследования, которые направлены на изучение влияния различных возмущений (акустических волн, вибраций, автоколебаний) на возникновение и развитие турбулентности потоков [1,3,4].

Такие исследования чрезвычайно важны уже потому, что современные методы интенсификации тепловых и диффузионных процессов основаны скорее на более быстром возрастании затрат энергии, чем на увеличении количества переносимого тепла или массы вещества.

Однако известны случаи, когда, например, рост теплоотдачи

превышает рост гидравлического сопротивления. Указанный метод интенсификации обнаружен Дрейцером Г.А., Калинин Э.К. и др. при изучении теплоотдачи на стенках каналов с дискретной турбулизацией потоков при вынужденной конвекции. Ими установлено, что наличие на стенках каналов выступов высотой 5-10% от радиуса трубы и с шагом в 5÷10 раз большим толщины пристеночного слоя теплоносителя способствует закручиванию потока и созданию вихрей в этом слое. Оребрение труб позволяет увеличить коэффициент теплопередачи на 50%.

Создание автоколебаний в потоке газа способствует интенсификации теплообменного газожидкостного процесса без дополнительных затрат энергии. Это достигается за счет перераспределения потерь энергии. При прохождении газа через контактные устройства с резонирующими полостями в его потоке возникают автоколебания, которые усиливают перемешивание с жидкостью у поверхности раздела фаз. В этом случае сопротивление поверхностного слоя переносу массы вещества снижается и скорость массопереноса возрастает [6].

В интенсификации тепломассообменных процессов перерабатывающих и пищевых производств можно выделить такие направления:

- повышение эффективности перемешивания тех объемов или слоев фаз, которые оказывают основное сопротивление тепломассопереносу;
- создание развитой поверхности контакта фаз;
- увеличение скорости относительного движения фаз;
- создание условий для образования вихрей оптимального размера в зоне контакта фаз и в объеме перемешиваемой среды;
- совершенствование условий контакта фаз;
- создание при межфазном обмене нестационарных режимов за счет изменения профилей, концентраций, скоростей и температур потоков;
- реализация тепломассообменных процессов в условиях гидродинамической неустойчивости межфазной поверхности;
- создание неравновесных состояний с большими температурными и концентрационными градиентами.

Например, интенсифицировать массообменный процесс в ректификационных колоннах можно за счёт усовершенствования локального контакта фаз на тарелках и улучшения распределения потоков по ним для устранения застойных зон жидкости, байпасного

движения фаз, которое более чем на 50% может уменьшить эффективность ведения процесса.

Экспериментально установлено [7], что при использовании постоянного тока с напряженностью поля $E = 3,7 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^5$ В/м² процесс абсорбции углекислого газа проходит интенсивнее, чем при переменном токе. Наибольший эффект получен при отрицательной полярности коронирующего электрода. Коэффициент массопередачи увеличивается в 1,7 раза. Интенсивное поглощение отрицательных ионов углекислого газа объясняется их большей подвижностью по сравнению с положительными ионами. Эффективной также является предварительная ионизация газа. В этом случае упрощается конструкция массообменного аппарата, но уменьшается эффективность ведения процесса вследствие частичной потери зарядов ионизированного газа на участке от ионизатора до абсорбера [1].

Нашими исследованиями выявлено увеличение в 2-3 раза коэффициента теплоотдачи пара на твердой охлаждаемой поверхности при создании электрического поля внутри транспортирующих труб. Диаметр трубы равнялся 0,08 м, а напряжение между центральным коронирующим электродом и трубой $1 \cdot 10^3$ - $2 \cdot 10^3$ В [1].

Массообмен между газом и жидкостью – распространенный процесс в пищевых технологиях. Известны теоретические работы [1,4,5 и др.], в которых массообмен описан с помощью гидродинамических параметров состояния жидкости, например:

$$\beta_L = C(S_C)^{-\frac{1}{2}} (E \cdot \nu)^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

где β_L – коэффициент массоотдачи, м/с; $S_C = \frac{\nu}{D}$ – число Шмидта; ν – коэффициент кинематической вязкости м²/с; D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; E – диссипация энергии, Вт/м³; C – эмпирический коэффициент.

Вследствие отсутствия обобщающей гидродинамической теории не разработана достаточно полная модель массопередачи. Для анализа процесса используют расчетные зависимости, полученные на основе диссипативной модели массопередачи [8,9]. Модель имеет существенные ограничения по применению, однако, полезным в ней является то, что в основу ее построения заложена диссипация энергии E и гидродинамическая характеристика –

градиент скорости dw/dx , а также характеристика среды – динамическая вязкость μ .

Для определения диссипации энергии E , обусловленной вязкостью μ , выделим элементарный куб объемом dV с длиной ребер dx , dy , dz . При градиенте скорости dw/dx диссипация энергии E вихрей в объеме будет описываться уравнением :

$$E = \mathbf{g} \cdot d\mathbf{F} \frac{dz}{t \cdot dV} = \mu \left(\frac{d\mathbf{w}}{dx} \right)^2, \quad (2)$$

где $\mathbf{g} = \mu \cdot dw/dx$ - касательное напряжение; $dF = dy \cdot dz$ - площадь боковой грани куба; $t = dz/dw$ - время сдвига противоположной грани куба на расстояние равное dz при градиенте скорости dw/dx .

Существующие в потоке турбулентные вихри размером δ обуславливают изменение скорости потока на величину $\Delta\omega$, поэтому градиент скорости выразится следующим образом:

$$\frac{\Delta \omega}{\delta} = \frac{d\mathbf{w}}{dx} \quad (3)$$

Подставим (2) в (3) и определим градиент скорости:

$$\frac{\Delta \omega}{\delta} = \sqrt{\frac{E}{\mu}} \quad (4)$$

При интегрировании уравнения нестационарной диффузии, в случае допущения постоянного времени контакта τ для всех элементов, получим следующее, известное как формула Хигби, значение коэффициента массоотдачи β :

$$\beta = 2\sqrt{D/(\tau \vartheta)}, \quad (5)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии.

В соответствии с предложенной моделью время контакта вихрей будет таким:

$$\tau = \alpha_1 \cdot \frac{\delta}{\Delta\omega}, \quad (6)$$

где α_1 - коэффициент.

Подстановкой (4) в (6), а (6) в (5) получим коэффициент массоотдачи:

$$\beta = \alpha \sqrt{D / (E \cdot \mu)}, \quad (7)$$

где $\alpha = 2 / \sqrt{\pi}$, α - коэффициент.

Формула (7) соответствует известной зависимости (1). В неё входит интегральное значение величины динамической вязкости и учитывается молекулярная и турбулентная вязкость.

Известно, что на поверхности жидкости турбулентные вихри дополнительно гасятся за счет действия сил поверхностного натяжения σ . Поэтому на поверхности жидкости образуются две, изменяющиеся во времени и по размерам, зоны. В одной зоне образуется постоянно обновляющаяся поверхность, а в другой – у поверхности образуется пограничный слой толщиной Z . Для турбулизации поверхностного слоя и создания равномерного по толщине сопротивления переносу массы вещества поверхность жидкости можно облучить акустическими волнами частотой f . Частоту определяют из условия равенства периода акустических колебаний времени τ контакта вихрей в объеме:

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{E}{\mu}}, \quad (8)$$

Толщина пограничного слоя f полного перемешивания при воздействии акустических волн равна:

$$Z = \frac{P}{\sqrt{2 \rho \mu \omega^3}}, \quad (9)$$

где $\omega = 2\pi$ - круговая частота акустических волн; P - звуковое давление.

Примем толщину Z пограничного слоя равной размеру δ вихря и, исходя из зависимостей (4) и (9), определим пороговую величину звукового давления акустических волн:

$$P = \Delta W \cdot \mu \sqrt{2 \cdot \rho \omega^3 / E} \quad (10)$$

Экспериментальными исследованиями подтверждены зависимости (7, 8, 10). Для массообменных процессов оптимальная частота акустических колебаний была близкой к $1 \cdot 10^3$ Гц при диссипации энергии $E \approx 10^3$ Вт/м³ [1].

Для повышения эффективности работы массообменных аппаратов при их конструировании и модернизации целесообразно проводить тщательный анализ и оптимизацию энергетических

затрат.

В производстве продуктов питания используется разнообразная массообменная аппаратура с широким диапазоном диссипации энергии в активной зоне. Известные теоретические и экспериментальные данные показывают, что с увеличением диссипации энергии скорость массообменного процесса и, соответственно, энергетические затраты возрастают и необходима их оптимизация [9].

В основу решения задачи оптимизации положен анализ приведенных затрат [10]. В качестве обобщённой оценки эффективности работы массообменного аппарата примем сумму годовых приведенных затрат для выпуска продукта в аппарате при массопереносе M [кг/год]:

$$Z = (Z_o + Z_k + Z_z + Z_e + Z_t) / M, \quad (11)$$

где $Z_o = H_o A_o \cdot (V_c + V_a)$ – годовые капитальные вложения и амортизационные отчисления на один аппарат, грн/год; $Z_k = H_k A_k \cdot (V_c + V_a)$ – годовые капитальные вложения и амортизационные отчисления на здание и сооружение, которые приходится на один аппарат, грн/год; $Z_z = A_z \cdot (V_c + V_a)$ – годовой фонд зарплаты при эксплуатации одного аппарата, грн/год; $Z_e = A_e \cdot E \cdot V_a \cdot T$ – годовая стоимость энергии, затрачиваемой на работу одного аппарата, грн/год; $Z_t = A_t \cdot (V_c + V_a)$ – остальные годовые текущие затраты на один аппарат, зависящие от объема аппарата, грн/год; H_o – нормативный коэффициент капвложений и амортизационных отчислений на капитальный ремонт аппарата 1/год; H_k – нормативный коэффициент капвложений и амортизационных отчислений на капитальный ремонт здания, 1/год; A_o – удельная первоначальная стоимость аппарата, грн/м³, A_k – удельная первоначальная стоимость здания, грн/м³; V_c, V_a – объемы, соответственно, неактивной (сепарационной) и активной зоны аппарата, м³; A_z – удельный фонд зарплаты, грн/м³; T – годовой фонд времени работы аппарата, с/год; A_e – стоимость 1 Дж энергии, грн/Дж; E – диссипация энергии в активной зоне аппарата, Вт/м³; A_t – удельная годовая стоимость остальных текущих затрат, грн/м³год.

После подстановки соответствующих слагаемых в (11) получим сумму годовых приведенных затрат:

$$Z = [(H_o A_o + H_k A_k + A_z T + A_t) \cdot (V_a + V_c) + A_e E V_a T] / M \quad (12)$$

Годовое количество перенесенной массы M вещества в

аппарате составит:

$$M = ka \cdot V_a \cdot \Delta C T = A \cdot E^n \cdot V_a \cdot \Delta C T, \quad (13)$$

где $ka = AE^n$ - объемный коэффициент массопередачи; A - коэффициент; n - показатель степени; ΔC - движущая сила процесса, кг/м^3 .

$$\text{Обозначим: } V_c = A_v \cdot V_a \quad (14)$$

где A_v - коэффициент.

Подставим V_a из (13) и V_c из (14) в (12) и получим

$$Z = B_1 E^{-n} + B_2 E^{-n} + B_3 E^{-n} + B_4 E^{1-n} + B_5 E^{-n}, \quad (15)$$

где $B_1 = H_o A_o (1 + A_v) \frac{1}{A \cdot \Delta C T}$; $B_2 = H_k A_k (1 + A_v) \frac{1}{A \cdot \Delta C \cdot T}$;

$$B_3 = A_3 (1 + A_v) \frac{T}{A \cdot \Delta C T}; \quad B_4 = A_e \frac{1}{A \cdot \Delta C};$$

$$B_5 = A_t (1 + A_v) \frac{1}{A \cdot \Delta C T};$$

$$\text{Минимум функции } Z = Z(E) \text{ будет при } \frac{dZ}{dE} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{dZ}{dE} = 0 \text{ при } E > E_{\text{опт}}; \quad \frac{dZ}{dE} = 0 \text{ при } E < E_{\text{опт}} \quad (17)$$

Минимум приведенных затрат будет при $E = E_{\text{опт}}$. Из уравнения (16) определим оптимальное значение диссипации энергии:

$$E_{\text{опт}} = \frac{n(1 + A_v)(H_o A_o + H_k A_k + A_3 T + A_t)}{(1 - n)A_e T} \quad (18)$$

Таким образом, если диссипация энергии в аппарате $E < E_{\text{опт}}$, то целесообразно вводить в аппарат дополнительно энергию для интенсификации процесса.

Выводы

1. Турбулизация гидродинамических течений увеличивает массоотдачу и теплоперенос, а потому при конструировании аппаратуры необходимо стремиться создавать в потоках жидкости возмущения с использованием акустических волн, вибраций, автоколебаний, оребрений транспортирующих труб и исключать застойные зоны в аппаратах.

2. Созданием электрического поля внутри транспортирующих труб можно в 1,7-3 раза увеличить коэффициенты массопередачи и теплоотдачи в газожидкостных технологических средах.

3. Для повышения эффективности работы массообменных аппаратов целесообразно лишь тогда вводить в аппарат дополнительную энергию, когда диссипация энергии в нем меньше рассчитанного оптимального значения.

Список литературы

1. Интенсификация процессов и защита оборудования пищевых производств: Монография /Под ред. проф. Ю.Г. Сухенка. – К.: ТОВ «ДІЯ», 2006. – 254 с.

2. Борщевский П.П. Интенсификация производств в пищевой промышленности. – К.: Урожай, 1989. – 136 с.

3. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Теплообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.

4. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая шк., 1979. – 439 с.

5. Процеси і апарати харчових виробництв: Підручник / За ред. проф. І.Ф. Мележика. К.: НУХТ, 2003. – 400 с.

6. Ермаков П.П. Барботажные контактные устройства массообменных аппаратов с автоколебаниями газового потока: Автореф. дис... канд. техн. наук. - Киев, 1984. - 24 с.

7. Агаев А.А., Ибрагимов В.И., Курбаналиев Т.Г. Исследование абсорбции газов в электрическом поле. Ученые записки Азербайджанского института нефти и химии, №5, 1976. №5 - с. 45-50.

8. Михеев М.А, Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

9. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача.-М.: Химия,- 1982.- 696 с.

10. Майков В.П., Цветков А.А. Методика сравнения эффективности контактных массообменных устройств. - ТОХТ, 1984. - Т.VI, №2. - С. 269-275.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В ПЕРЕРОБНИХ І ХАРЧОВИХ ГАЛУЗЯХ

Наведені огляд і аналіз способів інтенсифікації тепломасообмінних процесів. Вказані напрями досліджень, які можуть бути найбільш ефективними. Дані рекомендації з

конструювання апаратів.

INTENSIFICATION OF THERMAL MASS-TRANSFER OF PROCESSES IN PROCESSING AND FOOD INDUSTRIES

A review and analysis of methods of intensification of Thermal mass-transfer processes is resulted. Directions of researches which can be most effective are indicated. Recommendations are executed on constructing of vehicles.