

Марценюк О. С.

Національний
університет
харчових
технологій

УДК 66.0:664.001

ЗВ'ЯЗОК КОЛИВАЛЬНО-ХВИЛЬОВИХ І ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ В АПАРАТАХ З РЕГУЛЯРНИМИ НАСАДКАМИ

На примере непрерывных волн показано, что в технологических аппаратах существует прямая и обратная связь между колебательно-волновыми и теплообменными процессами. Наложением колебаний с частотами $8...12\text{с}^{-1}$ можно интенсифицировать массообмен в колоннах с регулярными насадками.

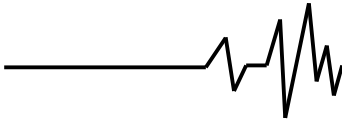
It is shown on the example of continuous waves, that in technological apparatuses there is direct and reverse connection between oscillation-wave and heat-mass-transfer processes. By imposition of vibrations with frequencies from 8...to 12s^{-1} it is possible to intensify mass transfer in columns with regular packing's.

Вивчення і практичне застосування коливально-хвильових явищ є одним із перспективних напрямків інтенсифікації тепломасообмінних процесів у протитечійних газорідних апаратах з регулярними пакетними насадками, в яких реалізується гравітаційне стікання плівки. Регулярні насадки порівняно з нерегулярними (засипаними внавал) дозволяють з меншими витратами гідравлічного опору організувати рух і тісне контактування взаємодіючих потоків та знизити вартість енергетичних ресурсів на прокачування газового середовища через апарати.

Технологічні процеси під час прокачування газів і рідин завжди супроводжуються коливально-хвильовими явищами. Локальні зміни параметрів, що виникають внаслідок контактування фаз (густин, тисків, концентрацій, температур) приводять до місцевих змін об'ємів у різних зонах середовища і утворення об'ємних коливань – неперервних хвиль (їх ще називають концентраційними) і динамічних (пружних) хвиль різних інтенсивностей, масштабів і напрямків руху, які поширюються всередині об'єму пружного (рідкого і газового) середовища [4, 6].

Зміна параметрів у різних зонах контактування фаз внаслідок різних напрямків і швидкостей руху потоків, можливих місцевих проникнень газу в рідину з розривами суцільностей, утворень і розривань газових бульбашок та змін поверхневого натягу приводять до нестабільності міжфазної поверхні і утворення при взаємодії з силами гравітації інерційних, гравітаційних і капілярних хвиль, які умовно можна назвати поверхневими хвилями. Об'ємні і поверхневі хвилі, які виникли в окремих місцях апарата, взаємодіють між собою, поширюються всередині апарата і, в свою чергу, впливають на інтенсивність перебігу технологічних процесів у більш віддалених зонах апарата.

Важлива особливість коливально-хвильових процесів з точки зору їх впливу на інтенсивність тепломасообміну полягає в тому, що вони в апаратах поширюються зі швидкостями, які, як правило, перевищують швидкості руху робочого середовища і, приводячи в коливальний рух середовище у більш віддалених зонах, прискорюють конвективну дифузію (процеси тепломасообміну) в місцях, куди ще не дійшли конвективні рухи, викликані механічним переміщенням об'ємів продукту. Тобто,



коливально-хвильові явища переносять інформацію про певні процеси в ті зони середовища, де ці процеси ще не розпочались, готують ці зони до змін і безпосередньо ініціюють ці зміни.

Як один з прикладів розглянемо поширення неперервних хвиль, що виникають у потоках внаслідок змін їх об'ємної витрати. При постійній початковій витраті продукта через апарат причиною локальних змін об'ємних витрат продукта можуть бути зміни фізико-хімічних параметрів в окремих точках (зонах) апарата: температур, тисків, концентрацій, густин та ін. Скористуємося поняттям об'ємної витрати продукта, віднесеної до одиниці площі поперечного перерізу потоку, яку позначимо j , м/с (розмірність об'ємної витрати м³/с, площі перерізу м²). Хай у якійсь зоні апарата компонент концентрацією α в м³/м³ переходить з однієї фази в іншу – при цьому змінюється об'ємна витрата продукту і відповідно змінюється швидкість руху продукту V , м/с. Вказані величини зв'язані між собою залежністю

$$j = \alpha V \quad (1)$$

Внаслідок зміни об'ємної витрати (і швидкості) середовища утворюється неперервна хвиля, що рухається в апараті (в каналі) зі швидкістю V_w . У найпростішому випадку одновимірного потоку (в видовженому каналі, де враховується лише один лінійний розмір), швидкість V_w можна визначити за умови нерозривності рідини у двох перерізах aa і bb потоку, допускаючи, що відносно фронту хвилі надходження і стік речовини однакові. Маємо

$$j - \alpha V_w = j + \partial j - V_w(\alpha + \partial \alpha),$$

звідки

$$V_w = \left(\frac{\partial j}{\partial \alpha} \right)_f \quad (2)$$

Отже, якщо у якійсь точці потоку витрата субстанції змінюється, то таке явище супроводжують неперервні хвилі, що поширюються зі швидкістю V_w (2).

Якщо різниця концентрацій між перерізами aa і bb має кінцеве значення, то з (2) середня швидкість

$$V_s = \left[\frac{j_1 - j_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \right]_f, \quad (3)$$

де V_s має назву «швидкість неперервної ударної хвилі». Індекс f означає, що на початку і в кінці хвилі сили опору підтримуються однаковими і що впливу інерції немає.

Неперервні хвилі спостерігаються у системах, де гравітаційні (масові) сили b зрівноважуються силами опору f . Якщо масова сила b постійна, то й сила опору f , що припадає на одиницю об'єму, також має бути постійною, оскільки потік не прискорюється. Той факт, що j є функцією α , означає, що i постійна сила опору є одночасно функцією j і α , тобто $f = \varphi(j, \alpha)$. Оскільки $j = \alpha V$, то можна записати

$$f = \varphi(V, \alpha). \quad (4)$$

З урахуванням (1) і (2) дістанемо

$$V_w = V + \alpha \left(\frac{\partial V}{\partial \alpha} \right)_f. \quad (5)$$

Із (5) випливає, що швидкість неперервної хвилі перевищує середню швидкість її потоку V на величину

$$\alpha \left(\frac{\partial V}{\partial \alpha} \right)_f.$$

Визначимо швидкість неперервної хвилі для випадку стікання рідини по вертикальній поверхні листів плоско-паралельної насадки, а також профіль поверхні плівки. Витрата на одиницю ширини в'язкої рідини плівки, що стікає по вертикальній стінці (лінійна щільність зрошення), залежно від її товщини визначається рівнянням

$$q = \frac{g(\rho_p - \rho_r)\delta^3}{3\mu_p}, \quad (6)$$

де g – прискорення вільного падіння; ρ_p і ρ_r – густини відповідно рідини і газу, δ – товщина плівки; μ_p – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини. У випадку, що розглядається, товщина плівки δ , може бути ототожнена з концентрацією α , а витрата на одиницю ширини q може бути ототожнена з витратою j . Із рівняння (6) середня швидкість рідини

$$V = \frac{q}{\delta} = \frac{g(\rho_p - \rho_r)\delta^2}{3\mu_p}. \quad (7)$$



Швидкість неперервної хвилі визначимо з (6):

$$V_w = \frac{\partial q}{\partial \delta} = \frac{g(\rho_p - \rho_r)\delta^2}{\mu_p} \quad (8)$$

Порівнюючи (7) і (8), дістанемо

$$V_w = 3V \quad (9)$$

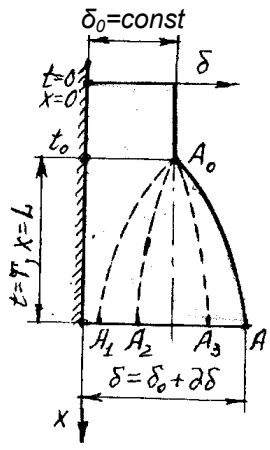


Рис. 1. Змінення лінії течії плівки внаслідок змінення параметрів потоку

тобто, якщо не враховувати силу тертя, то швидкість поширення неперервної хвилі у плівці, що стікає, за наявності градієнта концентрації (наприклад, внаслідок масообміну) втричі перевищує середню швидкість плівки.

Якщо вважати, що рідина на стінку не підводиться, то неперервні хвилі із зони збурень будуть приносити плівки відповідних товщин, причому кожна буде поширюватись із своєю швидкістю згідно з (8). Якщо в початковий момент руху ($t=0, x=0$) плівка рухалась з постійною товщиною $\delta_0 = const$ (рис. 1), то починаючи з моменту утворення t_0 (і місця A_0) поширюються хвилі, які через час $t=T$ і відстань $x=L$ відповідають усім значенням $\delta_0 \pm \partial \delta$. Протягом часу t хвиля пройде відстань

$$x = V_w t \quad (10)$$

де x — вертикальна координата.

Підставляючи в (8) вираз (10), будемо мати рівняння руху неперервних хвиль

$$x = \frac{g(\rho_p - \rho_r)\delta^2}{\mu_p} t. \quad (11)$$

Розглянемо цей же випадок, але з урахуванням сили тертя. Дотичне напруження

$$\tau_w = c_f \frac{\rho V^2}{2}, \quad (12)$$

де c_f — коефіцієнт втрати швидкості внаслідок тертя.

Ототожнюючи товщину плівки δ з концентрацією α , одержимо вираз для сили, що припадає на одиницю об'єму:

$$f = \frac{\tau_w}{\delta} = \frac{c_f \rho V^2}{2\delta}. \quad (13)$$

Рівняння (4) у диференціальній формі можна записати так:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial \alpha}\right) = - \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)_V / \left(\frac{\partial f}{\partial V}\right)_\alpha. \quad (14)$$

Об'єднаємо (5) і (14):

$$V_w = V - \alpha \frac{f_\alpha}{f_V}. \quad (15)$$

де індекси α і V стосуються відповідних часткових похідних.

У нашому випадку

$$f_\alpha = f_\delta = \frac{\partial f}{\partial \delta} = \frac{c_f \rho V^2}{2\delta^2} \quad \text{і} \quad f_V = \frac{\partial f}{\partial V} = \frac{c_f \rho V}{\delta},$$

отже, із (15) маємо

$$V_w = V - \frac{\delta(-c_f \rho V^2 / (2\delta^2))}{c_f \rho V / \delta}$$

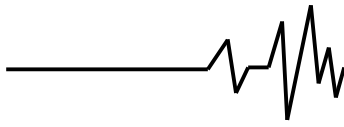
або

$$V_w = \frac{3V}{2} \quad (16)$$

тобто з урахуванням сили тертя швидкість поширення хвилі у разі плівкової течії в півтора рази перевищує середню швидкість плівки.

Таким чином, рух неперервних хвиль дає змогу переносити в потоці зміни параметрів середовища. Якби неперервних хвиль не існувало, то локальні зміни параметрів середовища не могли б так швидко впливати на механізм перенесення у більш віддалених точках середовища.

У наведеному вище розгляді причиною утворення неперервних хвиль була прийнята



зміна концентрації компонента в рухомому середовищі, викликана внутрішньою причиною - перебігом процесу масообміну в апараті. Найважливішими внутрішніми причинами утворення хвиль, згідно з потрібною аналогією, є також зміна температур (рушійна сила теплових процесів) і зміна тисків (рушійна сила гідромеханічних процесів). Взагалі ж всі параметри робочої системи взаємопов'язані, рівноцінні і при відповідних умовах можуть проводити до аналогічних ефектів.

Слід звернути увагу на те, що рівноцінною причиною утворення неперервних хвиль можуть бути і зовнішні впливи: підведення (або відведення) із зовні маси (компонента або основного продукту), теплоти, коливальних рухів та дія інших технологічних факторів.

Коливально-хвильові процеси, що виникають внаслідок тепломасообміну, в свою чергу впливають на інтенсивність перебігу процесів, які привели до їх утворення, тобто завжди існує прямий і зворотний зв'язок між процесами тепломасообміну і гідродинаміки.

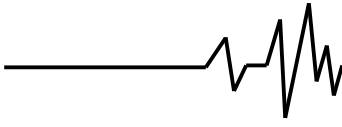
Хвилі, що поширюються в об'ємі середовища, переносять з собою певну кількість енергії, яка приводить в коливальний рух частинки середовища у зоні проходження хвиль. Дію хвиль на інтенсивність перенесення субстанції можна пояснити [1,5] на основі висновків теорії локальної анізотропної турбулентності Колмогорова—Обухова. Кожний окремий коливальний рух являє собою накладання на осереднений спрямований рух потоку пульсаційної зміни швидкості із змінними напрямком і амплітудою. Цей коливальний рух характеризується пульсаційною швидкістю V'_λ і масштабом λ — відстанню, на якій миттєве значення швидкості змінюється на величину V'_λ . Період T_λ пульсації масштабу λ — тривалість зміни швидкості на величину V'_λ — за порядком дорівнює приблизно λ/V'_λ . Максимальним значенням пульсаційних швидкостей у потоці відповідає максимальний масштаб $\lambda = l$, що характеризує розмір ділянки, на яку поширюється пульсація (якщо вона не обмежується стінками апарата). За порядком значення пульсаційна швидкість V'_λ відповідає різниці значень середньої швидкості на відстані l . Такі пульсації мають назву макромасштабних.

Вони несуть основну частину кінетичної енергії колювання і характеризуються найбільшим періодом або найменшою частотою $\nu_1 = 1/T_1$.

Макромасштабні (первинні) пульсації розпадаються на пульсації з більш високими частотами, які характеризуються меншими значеннями V'_λ і λ . Отже, стосовно коливального руху, як і турбулентного режиму руху взагалі, можна говорити про безперервний спектр пульсаційних швидкостей і масштабів. У разі штучного створення колювання ми задаємо колювання з потрібними характеристиками або накладаємо на систему інтенсивніші колювання, які, розпадаючись, забезпечують спектр колювань потрібного масштабу.

Інтенсивність перенесення енергії пульсаційними рухами масштабу λ оцінюють критерієм Рейнольдса $Re_\lambda = V_\lambda d/\nu$, який є мірою відношення інерційних сил до сил в'язкого тертя при перенесенні імпульсу на відстань λ (l — визначальний геометричний розмір пульсаційного руху, V — кінематичний коефіцієнт в'язкості). Для макропульсацій масштабу $\lambda \approx l$ значення Re_λ суттєво перевищують одиницю і перенесення на відстань порядку λ здійснюється практично без участі в'язких сил, тобто без розсіювання (дисипації) енергії. У міру зменшення масштабу руху критерій Re_λ зменшується і при певному критичному значенні масштабу λ_0 (так званий внутрішній масштаб турбулентності) стає близьким до одиниці. В області масштабів $\lambda < \lambda_0$ (дисипативні масштаби) вплив в'язкості суттєвий і мікромасштабні рухи супроводжуються переходом кінетичної енергії в теплову. Отже, кінетична енергія пульсаційних рухів, проходячи серію перетворень від крупних до дрібніших пульсацій, перетворюється в енергію теплового руху молекул. Тому коливальний рух (або турбулентну течію) можна підтримувати лише при безперервному підведенні енергії із зовні або за рахунок використання енергії, що утворюється внаслідок внутрішніх перетворень (реакцій) в апараті.

Якщо розмір зони, яка підлягає інтенсифікації за допомогою колювань,



відповідає умові $\lambda_0 < \lambda_3 < l$, то у потоці завжди існують пульсації, масштаб яких відповідає розміру зони. Проте енергія вторинних пульсацій, що утворилися внаслідок розпадання пульсацій великого масштабу, може бути недостатньою для відчутного впливу на потік. Тому на потік доцільно накладати коливання потрібних характеристик, а не турбулізувати його в цілому, сподіваючись, що якісь частотні характеристики, відповідаючи масштабу і частотам зони (апарата), сприятимуть інтенсифікації.

Масштаб коливань має відповідати масштабу тих ділянок системи, які підлягають інтенсифікації. У свою чергу, переважаюча частота коливань має відповідати частоті власних коливань системи і тому частотному рівню на якому досягається максимальна інтенсифікація режиму взаємодії.

Проаналізувати на основі законів механіки рідин сумарний вплив коливально-хвильових явищ на процеси тепломасообміну вдається лише в окремих спрощених випадках, але можна стверджувати, що коливально-хвильові процеси в цілому додатково турбулізують потоки і сприяють перенесенню субстанції як всередині фаз, так і крізь міжфазну поверхню. Завдання інтенсифікації тепломасообміну полягає в знаходженні таких способів і параметрів накладання коливань, при яких додатково підведена енергія давала б максимальний ефект.

Узагальнена картина гравітаційного стікання плівки рідини по вертикальній поверхні листів плоскопаралельної насадки в ламінарно-хвильових режимах, має наступний вигляд. Під місцем розподілу зрошення (на вхідній ділянці течії) довжиною 2...10см (залежно від витрати рідини) формується профіль розподілу швидкостей по товщині плівки і хвилі на поверхні плівки ще відсутні. Нижче цієї ділянки виникають і розвиваються регулярні хвилі (ділянки усталеної течії довжиною 10...30см), далі регулярність хвильової течії порушується. На поверхні регулярних хвиль утворюються капілярні хвилі. По мірі стікання вниз накладання регулярних і капілярних хвиль приводить до все більшого порушення регулярності течії і по поверхні плівки час від часу пробігають (прокочуються) окремі великі гравітаційні хвилі, що проносять з собою збільшені об'єми рідини.

На ділянці нерегулярної (неусталеної) течії плівка рідини має нерівну поверхню з неоднаковими профілями, амплітудами і довжинами хвиль, яку можна ототожнити з твердою стінкою, що має нерівномірну

шорсткість [2,3]. Утворені хвилями пульсації проникають в пограничні шари і посилюють тепломасообмін. Внаслідок нестаціонарності течії можна говорити лише про усереднені параметри коливально-хвильових явищ.

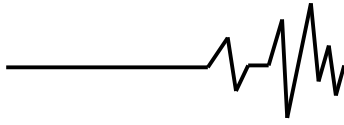
Дослідження впливу низькочастотних коливань на масообмін при плівковій течії [2] показують, що в насадкових апаратах основний вплив на підвищення інтенсивності масообміну мають параметри плівкової течії, а пульсації газової фази не завжди приводять до відчутного ефекту. Досліди з накладання коливань на рідку фазу [2] проведені у трубчастому плівковому елементі при десорбції вуглекислого газу із води і водних розчинів гліцерину повітрям при температурі 25°C. Амплітуда коливань A змінювалась від 15 до 25мм, частота f від 2 до 15с⁻¹, швидкість повітря у вільному перерізі трубки була 0,3м/с, щільність зрошення 0,106...0,256м³/(м².год).

Результати досліджень показали, що накладанням вертикальних коливань на трубчастий плівковий елемент коефіцієнти масопередачі у рідкій фазі збільшуються на 50...100%, причому максимальній ефективності відповідають частоті 8..12с⁻¹. При зростанні інтенсивності пульсацій $J = A \cdot f$ більше 200мм/с спостерігалось відривання плівки від віброуючої трубки. Збільшення в'язкості рідини сприяло більшому підвищенню коефіцієнта масопередачі K_p , оскільки коливання трубчастого елемента більш відчутно турбулізують рідку плівку і змінюють форму її поверхні.

Аналогічні дослідження, проведені на елементі зі спіральною навивкою дроту діаметром 1,5мм і кроком 16мм, засвідчили про зростання коефіцієнта K_p до 1,5 разів, що пояснюється перерозподілом і турбулізацією поверхневих шарів рідини. Візуально при цьому спостерігалось утворення нестійких бульбашок у міжвитковому просторі при $f < 10с^{-1}$ і відривання крапель від поверхні плівки при $f > 10с^{-1}$. Збільшення f понад 12с⁻¹ не приводило до помітного зростання K_p , що можна пояснити збільшенням зворотного перемішування рідини.

В цілому в газорідних системах гідродинамічні параметри газорідного шару змінюються по висоті нерегулярно, причому середня частота пульсацій газонаповнення, швидкості газової фази, тиску знаходиться в межах 1...15с⁻¹.

Інтенсифікувати перенесення речовини в плівкових режимах течії за допомогою коливань можна принаймні трьома способами: пульсацією витрати рідини, вібрацією контактних елементів, створенням конструктивних елементів, які сприяють



коливальним рухам. Ускладнення практичної реалізації цих методів зв'язане насамперед з тим, що в газорідних системах відбувається швидше затухання накладуваних коливань.

Висновки

На основі розгляду причин виникнення і закономірностей поширення і впливу на перебіг процесу неперервних хвиль показано, що в технологічних апаратах існує прямий і зворотний зв'язок між коливально-хвильовими і тепломасообмінними процесами. Створюючи умови для спонтанного виникнення коливань або накладаючи на робочі системи штучні коливання, які відповідають резонансно-частотним характеристикам системи (наприклад, для протитечійних колон з регулярними насадками коливання з частотами переважно 8.. 12с⁻¹) можна інтенсифікувати процеси тепломасообміну.

Література

1. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах. – М.: Химия, 1984. – 336с.
2. Задорский В.М. Интенсификация газожидкостных процессов химической технологии. К.: Техніка, 1979. – 199с.
3. Кафаров В. В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1979. – 439с.
4. Марценюк О.С., Дубінін О.О., Тахістова Г.О. Коливання в гетерогенних системах // Наук. праці НУХТ. – К.: НУХТ. – 2002. - №12 (Додаток) – 43с.
5. Марценюк О.С., Копиленко А.В., Мельник Л.М., Жестерева Н.А. Інтенсифікація процесу абсорбції за допомогою коливань різного масштабного рівня // Наук. праці НУХТ. – К.: НУХТ. – 2002. - №12 – С. 70-72.
6. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. - 440с.