

УДК 532.517.2 : 62-634.5

Твердохліб О.О.

Штефан Є.В.

Серьогін О.О.

( Національний університет харчових технологій )

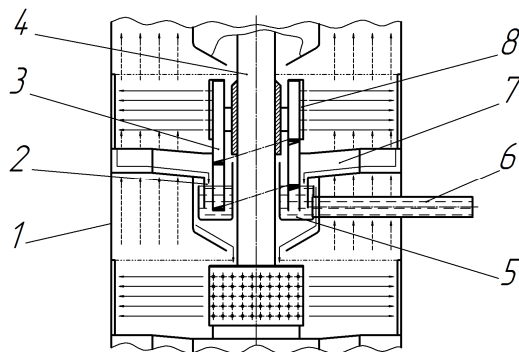
## УТВОРЕННЯ ТА ГІДРОДИНАМІКА ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ В МАСООБМІННОМУ СТУПЕНІ КОЛОННОГО РОТОРНОГО АПАРАТА

*Описаны отрасли использования и принцип действия роторного массообменного аппарата колонного типа. Представлена математическая модель движения капель в пространстве массообменной ступени роторного аппарата с диспергирующими устройствами в виде перфорированных цилиндров. Описан, в виде критериальных зависимостей, механизм вытекания струи жидкости с отверстия перфорированного цилиндра и дальнейшего образования капель для различных технологических жидкостей и режимов работы диспергирующего устройства. Используя математическое моделирование, выявлены закономерности влияния закрученного газового потока на траекторию полёта капли в пространстве массообменной ступени.*

*Industry branches of utilization and principle of operation the rotary mass-transfer column apparatus are described in the article. A mathematical model of drops motion within the space of mass-transfer stage of rotary apparatus with perforated cylindrical dispersing devices is presented. The character of leakage a liquid jet from a hole of perforated cylinder and the further formation of drops for different technological fluids and operation modes of the dispersing device is described in the form of criterial dependencies. Patterns of swirling gas flow's impact to the flight trajectory of a drop within the space of mass-transfer stage were identified on the basis of a mathematical model.*

### Вступ та основна частина

Роторні апарати з диспергуючими перфорованими циліндрами використовуються для проведення масообмінних процесів в харчовій, фармацевтичній та хімічній промисловості. Компактні роторні масообмінні апарати є перспективним видом обладнання для апаратурного оформлення вакуумної ректифікації, абсорбції, дистиляції та видалення великої кількості розчинника.



**Рис.1 - Масообмінний ступінь роторного апарата**

Роторні масообмінні апарати є енерго- та матеріалоощадним видом обладнання, мають низький гідравлічний опір, невеликі габаритні розміри, здатні працювати при малій витраті рідини та великій об'ємній витраті газу (пари), забезпечують високу ефективність розділення рідких сумішей і очистки газів та якість кінцевих продуктів.

Основними вузлами роторного апарата [1], є масообмінні ступені 2 (Рис. 1), які знаходяться в корпусі 1 апарата. Співвісно до корпусу 1 розміщується обертовий вал 4. На валу жорстко кріпляться диспергуючі пристрої 3, які нижньою гвинтовою частиною занурені у забірні чаші 5. Початкова суміш через патрубок 6 подається на масообмінний ступінь колони. Далі суміш піднімається гвинтовою частиною диспергуючого пристрою 3 і розбризкується його перфорованим циліндром 8 в об'ємі масообмінного ступеня. Пари низькокиплячої речовини, що утворилися в результаті випаровування на нижчих ступенях, вступають в масообмінний

процес з краплинами під час їх польоту та дотичного удару по стінці апарату, насичуються низькокиплячим компонентом і піднімаються до вищого масообмінного ступеня або відводяться на конденсацію. Краплі рідини, досягнувши стінки апарату по переточним жолобам 7 повертаються назад до забірної чаші 5 масообмінного ступеня, звідки основна частина знову відбирається диспергуючим пристроєм 3 на повторне розпилювання, а надлишок (рівний кількості початкової суміші) зливається в забірну чашу нижчого ступеня або в куб масообмінного апарату.

Для забезпечення ефективного проходження масообмінного процесу в апараті з диспергуючими перфорованими циліндрами необхідно: 1) збільшити час взаємодії окремої краплини з газовими (паровими) потоками під час її польоту в просторі масообмінного ступеня; 2) збільшити траєкторію польоту краплини в просторі масообмінного ступеня; 3) забезпечити падіння краплини на стінку корпусу апарату по траєкторії наближеної до дотичної. Вказані умови створюються за рахунок відповідного викривлення траєкторії польоту краплини. Цей ефект забезпечується завдяки дії на краплю закрученого газового потоку, який можуть створювати обертові та нерухомі завихрювачі.

Для виявлення закономірностей руху краплин рідини в просторі масообмінного ступеня проведені теоретичні дослідження динамічних характеристик краплі під час її польоту. Застосувавши другий закон Ньютона та врахувавши, що аеродинамічна сила  $F_a$  виникає внаслідок опору газового потоку у масообмінному ступені і залежить від швидкості краплі відносно повітря  $\vec{V}_{від} = \vec{u} - \vec{U}$ , розпишемо рівняння руху краплі по координатах щодо осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy}{d\tau} = u_y, \quad \frac{dz}{d\tau} = u_z, \quad \frac{dx}{d\tau} = u_x, \\ m \frac{du_y}{d\tau} = -\frac{1}{2} \rho_2 c_F (u_y - U_y) |\vec{V}_{від}| S, \\ m \frac{du_z}{d\tau} = -\frac{1}{2} \rho_2 c_F (u_z - U_z) |\vec{V}_{від}| S, \\ m \frac{du_x}{d\tau} = -\frac{1}{2} \rho_2 c_F (u_x - U_x) |\vec{V}_{від}| S - mg, \end{array} \right. \quad (1)$$

де  $x, y, z$  – координати краплини, м;  $u_y, u_z, u_x$  – компоненти швидкості краплі, м/с;  $U_y, U_z, U_x$  – компоненти швидкості газової фази, м/с;  $\tau$  – час переміщення краплі, с;  $m$  – маса краплі, кг;  $\rho_2$  – густина газової фази, кг/м<sup>3</sup>;  $c_F$  – емпіричний коефіцієнт, що дорівнює 0,40 для сфери [3];  $S$  – площа міделевого перерізу сферичної частки (навітрюваної частини поверхні), м<sup>2</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $|\vec{V}_{від}|$  – абсолютна величина вектора відносно швидкості краплі, м/с:

$$|\vec{V}_{від}| = \sqrt{(u_y - U_y)^2 + (u_z - U_z)^2 + (u_x - U_x)^2}. \quad (2)$$

Для циліндричних масообмінних ступенів рух крапель найпростіше характеризувати трьома компонентами швидкості у циліндричних координатах –  $u_r$ ,  $u_\varphi$  і  $u_x$ , відповідно вздовж радіуса апарату  $r$ , за нормаллю до нього  $\varphi$  і вздовж осі апарату  $Ox$  [3]. Швидкістю вздовж осі  $Ox$  апарату в початковий момент часу нехтуємо:  $u_x = 0$ . Абсолютна швидкість рідини  $u_k$  (м/с), що покидає отвір, знаходиться як геометрична сума векторів радіальної

швидкості витікання  $u_r$  (м/с) і колової швидкості перфорованого циліндра  $u_\varphi$  (м/с), які рідина набуває, потрапляючи в канал отвору:

$$u_k = \sqrt{u_\varphi^2 + u_r^2} . \quad (3)$$

Колова та радіальна швидкості знаходяться відповідно за формулами [3]:

$$u_\varphi = \omega \cdot R_1 , \quad (4)$$

$$u_r = 0,62 \cdot \omega \cdot \sqrt{R_1^2 - R_{en}^2} , \quad (5)$$

де  $\omega$  - кутова швидкість обертання перфорованого циліндра,  $c^{-1}$ ;  $R_1$  - зовнішній радіус перфорованого циліндра, м;  $R_{en}$  - внутрішній радіус поверхні рідини всередині перфорованого циліндра, м.

Експериментальне визначення дисперсності середовища, що створюється обертовим перфорованим циліндром, проводилось Макаровим Ю.І., Трошкіним О.А. та Плановським А.А. [2,4,5]. Авторами встановлено, що при обертанні циліндра з певною кутовою швидкістю із отвору витікає нерозривний струмінь довжиною  $L$ , який згодом розпадається на окремі дисперсні краплини різного діаметра. Розрізняється три види розпаду струменя в залежності від режиму і швидкості витікання: вісесиметричний, хвилеподібний та плівковий.

При невеликих колових швидкостях обертання ротора струмінь рідини має циліндричну форму. На деякій відстані від отвору розпочинаються вісесиметричні коливання струменя, в результаті розвитку яких, він розпадається на краплі. Зі збільшенням швидкості обертання циліндра збільшується швидкість витікання струменя і зростає вплив опору оточуючого газового середовища на його розпад. Крім вісесиметричних, в цьому режимі можна спостерігати хвилеподібні коливання струменя і його часткову деформацію. Подальше збільшення швидкості обертання циліндра призводить до деформації профілю струменя - він витягується в поперечному перетині і перетворюється в плівку, яка одразу розпадається на дрібні краплі.

Для умов розпаду, що характеризуються вісесиметричними коливаннями ( $We \leq 1000$ ) отримано:

$$\frac{L}{d_o} = 1,06 \cdot We^{1,0} \cdot Lp^{0,25} ; \quad (6)$$

Для розпаду при хвилеподібному режимі ( $1100 \leq We \leq 1700$ ):

$$\frac{L}{d_o} = 0,7 \cdot We^{1,0} \cdot Lp^{0,25} \quad (7)$$

Для умов при яких краплі утворюються з плівки рідини ( $We \geq 1800$ ):

$$\frac{L}{d_o} = 4,42 \cdot 10^5 \cdot We^{-0,8} \cdot Lp^{0,25} \quad (8)$$

В формулах (6 - 8):  $We = \frac{u_k^2 \cdot d_o \cdot \rho}{\sigma}$  - критерій Вебера;  $(9)$

$$Lp = \frac{\mu^2}{\sigma \cdot d_o \cdot \rho} - \text{критерій Лапласа}, \quad (10)$$

де  $\rho$  - густина рідини,  $кг/м^3$ ;  $\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості рідини,  $Н \cdot с/м^2$ ;  $\sigma$  - поверхневий натяг рідини,  $Н/м$ ;  $d_o$  - діаметр отвору перфорованого циліндра, м.

Роторні масообмінні апарати працюють, в основному, в області вісесиметричного та хвилеподібного виду розпаду струменя, і для них підтверджена справедливість виразів (6 - 8) в наступних межах зміни параметрів процесу та робочої рідини:  $u_k = 2 \div 15$  м/с;  $\rho = 800 \div 1300$   $кг/м^3$ ;  $d_o = 1,0 \div 3,2$  мм;  $\mu = (1,2 \div 39,0) \cdot 10^{-3}$   $Н \cdot с/м^2$ ;  $\sigma = (3,4 \div 7,2) \cdot 10^{-2}$   $Н/м$ .

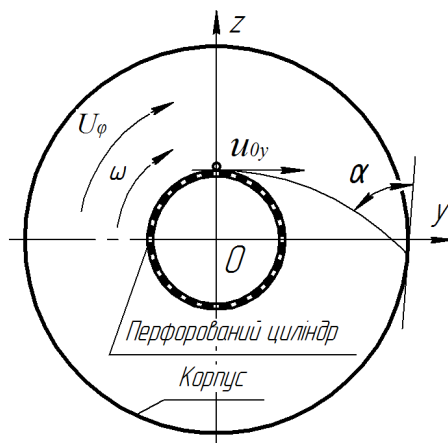


Рис.2 - Схема руху краплі у просторі масообмінного ступеня.

Як видно з виразів (6 - 8) величина числа Лапласа впливає на довжину суцільної ділянки струменя в однаковій мірі при різних видах розпаду. Внаслідок цього перехід від одного виду розпаду до іншого може бути охарактеризований значенням числа Вебера. Для вісесиметричного та хвилеподібного виду розпаду ( $We \leq 2000$ ) середній поверхневий діаметр краплі  $d_k$  та діаметра отвору  $d_o$  визначається з емпіричного рівняння [5]:

$$\frac{d_k}{d_o} = 19,7 \cdot We^{-0,5} \quad (11)$$

Рациональним вважається таке співвідношення частоти обертання перфорованого циліндра та діаметра його отворів, при якому забезпечується діаметр крапель в межах  $d_k = 1-2$  мм. При діаметрі краплі  $d_k < 1$  мм в ній відбувається затухання внутрішніх конвективних потоків і обтікання її газовим потоком набуває ламінарного характеру, що призводить до зниження інтенсивності масообміну та зростання ймовірності краплевитягу паро-газовим потоком. При діаметрі краплі  $d_k > 2$  мм зменшується масовіддача при польоті краплі та інтенсифікується вибивання, у вигляді крупних вторинних крапель, рідини, яка стікає в плівці по стінці апарату.

Важливою технологічною характеристикою роботи роторних масообмінних апаратів являється продуктивність диспергуючого пристрою, яка головним чином залежить від конструкції ( $R_l, d_o, \delta$ ) та кутової швидкості ( $\omega$ ) перфорованого циліндра.

Продуктивність перфорованого циліндра з товщиною стінки  $\delta = (0,4 \div 2,0) \cdot d_o$  можна розрахувати за формулою [6]:

$$Q = 0,73 \cdot k_o \cdot f_o \cdot \omega \cdot \sqrt{R_l^2 - R_{en}^2} \quad (12)$$

де  $k_o$  – кількість отворів в боковій стінці циліндра;  $f_o$  – площа поперечного перерізу отвору,  $m^2$ .

Рівняння (12) справедливе при:  $d_o = 1 \div 3$  мм;  $\omega = 30 \div 200$   $s^{-1}$ ; в'язкості рідини  $\nu_p = (1 \div 56) \cdot 10^{-6}$   $m^2/s$ ; відношенні горизонтальної відстані між центрами отворів до їх діаметра  $l/d_o \geq 2$ . При зменшенні відстані між отворами  $l$  продуктивність циліндра зменшується.

Для циліндрів з товщиною стінки  $\delta \leq 0,3 \cdot d_o$ , їх продуктивність визначається за формулою:

$$Q = 0,62 \cdot k_o \cdot f_o \cdot \omega \cdot \sqrt{R_l^2 - R_{en}^2} \quad (13)$$

Оскільки радіальна складова швидкості витікання рідини із отвору циліндра мала, в порівнянні з коловою швидкістю, то швидкість польоту краплі, з достатньою для інженерних розрахунків точністю, можна приймати рівною по величині і напрямку коловій швидкості перфорованого циліндра в точці вильоту із отвору.

Отже, приймаємо, що краплі зриваються по дотичній з обертового перфорованого циліндра радіусом  $R_l$ . Тому, у початковий момент  $\tau = 0$ , вектор швидкості краплі  $\vec{u}_0 = \{u_{0y}, u_{0z}, u_{0x}\}$  має такі складові:

$$u_{0y} = 2\pi R_l n, \quad u_{0z} = 0 \quad \text{і} \quad u_{0x} = 0, \quad (14)$$

де  $n$  – частота обертання ротора, об/с. У наступні проміжки часу  $\tau$ , крапля вільно переміщується у просторі масообмінного ступеня, підкоряючись другому закону Ньютона, аеродинамічній силі  $F_a$  і силі тяжіння  $-mg$ , тобто:

$$m \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \vec{F}_a - m\vec{g}. \quad (15)$$

Рух газу найпростіше характеризувати трьома складовими швидкості в циліндричних координатах -  $U_r$ ,  $U_\varphi$  і  $U_x$ , відповідно вздовж радіуса апарата  $r$ , за нормаллю до нього (закрутка)  $\varphi$  і вздовж осі апарата  $Ox$ . При цьому  $U_x$  і  $U_\varphi$  - задається, а складові швидкості газу  $U_y$  і  $U_z$  - знаходяться з наступних співвідношень:

$$U_y = -U_\varphi \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}, \quad U_z = U_\varphi \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (16)$$

### Висновки

При проведенні теоретичного дослідження (в середовищі програми MathCad) динамічних характеристик краплі на основі математичного моделювання її польоту в просторі масообмінного ступеня виявлено, що найбільший вплив на траєкторію польоту краплі та кут удару  $\alpha$  (Рис.2) має відношення швидкості відриву краплі від перфорованого циліндра  $u_{0y}$  до швидкості закрутки газового потоку  $U_\varphi$ . Встановлено, що зменшення відношення  $\frac{u_{0y}}{U_\varphi}$  призводить до зростання довжини траєкторії польоту краплі

та наближення кута удару краплі  $\alpha$  до дотичної в місці контакту зі стінкою апарату, що сприяє підвищенню ефективності та інтенсивності масообміну відповідно при польоті та ударі краплі та зменшенню питомих енергозатрат на одиницю готового продукту.

Використання результатів досліджень гідродинамічних параметрів рідкої та газоподібної фаз роторного масообмінного апарата дозволяє значно підвищити ефективність масообмінного процесу та кінцеву концентрацію вихідних фракцій, знизити кількість втрат компонентів рідкої суміші від краплевитягу, що дозволить економити матеріальні та енергетичні ресурси, спростити та здешевити обслуговування та експлуатацію обладнання, зменшити виробничі площі та збільшити мобільність обладнання за рахунок зменшення його одиниць.

### Література

1. “ Роторна ректифікаційна установка ” UA 36177 U від 10.10.2008 Бюл. №19. Твердохліб О.О., Сухенко Ю.Г., Сухенко В.Ю.
2. Макаров Ю.И., Трошкин О.А., Плановский А.А. О длине нераспавшегося участка струи, вытекающей из отверстия в боковой стенке вращающегося цилиндра//Теоретические основы химической технологии.-1971.-№5.-с.791-792.
3. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами.- М.: Машиностроение, 1994. - 320 с.
4. Трошкин О.А., Макаров Ю.И., Плановский А.А. Расчёт пропускной способности вращающегося тонкостенного полого цилиндра с отверстиями в боковой стенке//Химическое и нефтяное машиностроение.-1972.-№1.-с.13-14.
5. Трошкин О.А., Плановский А.А., Макаров Ю.И. Распад струи жидкости, вытекающей из отверстия в стенке вращающегося цилиндра//Теоретические основы химической технологии.-1972.-№4.-с.640-643.
6. Холин Б.Г. Центробежные и вибрационные грануляторы плавов и распылители жидкости.- М.: Машиностроение, 1977. - 182 с.