

ГІДРОДИНАМІКА ПЛІВКОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ ФАЗ У РОТОРНИХ РЕКТИФІКАЦІЙНИХ АПАРАТАХ

Л.Д. Пляцук, В.Я. Стороженко, Д.О. Лазненко, С.В. Сидоренко
Сумський державний університет, м. Суми

У статті розглядаються закономірності плівкового руху рідини у відцентровому полі роторних ректифікаційних апаратів. Отримані залежності для визначення швидкості однофазного руху плівки та з урахуванням протитечії газової фази.

Роторні ректифікаційні апарати (РРА) є напрямком розвитку високоінтенсивного тепломасообмінного обладнання. Сьогодні вони все більше застосовуються в хімічній та харчовій промисловості, природоохоронних технологіях і мають подальші перспективи до вдосконалення.

Процес масообміну в РРА відбувається в контактному пристрої, який розміщено всередині обертового ротора (рис. 1). Рідина подається на внутрішню поверхню контактної пристрою та рухається під дією відцентрових сил до периферії, а газ протитечєю від периферії до центра. Залежно від сфери застосування та завдань, що вирішуються на цьому типі обладнання, конструкції контактної пристрою та режими організації руху і взаємодії фаз можуть відрізнятися.

РРА залежно від організації взаємодії фаз поділяють на плівкові, розпилювальні та комбіновані плівково-розпилювальні. У плівкових апаратах рідина у вигляді плівки розподілена по поверхні контактної пристрою. Це забезпечує високу поверхню контакту фаз і відповідно ступінь масоперенесення.

Теоретичному та експериментальному дослідженню плівкової течії рідини присвячено багато робіт [1-5], в тому числі у відцентровому полі [1, 4]. У цих роботах наводяться залежності для визначення основних гідродинамічних характеристик плівкової течії - середня товщина плівки, швидкість руху, середній час перебування рідини в апараті та інші. Крім цього, важливим для проектування високо-ефективних плівкових апаратів є визначення характеру зміни швидкості руху рідини по товщині плівки. Це питання не було достатньо розглянуто в наведених роботах.

Рідка фаза в контактному

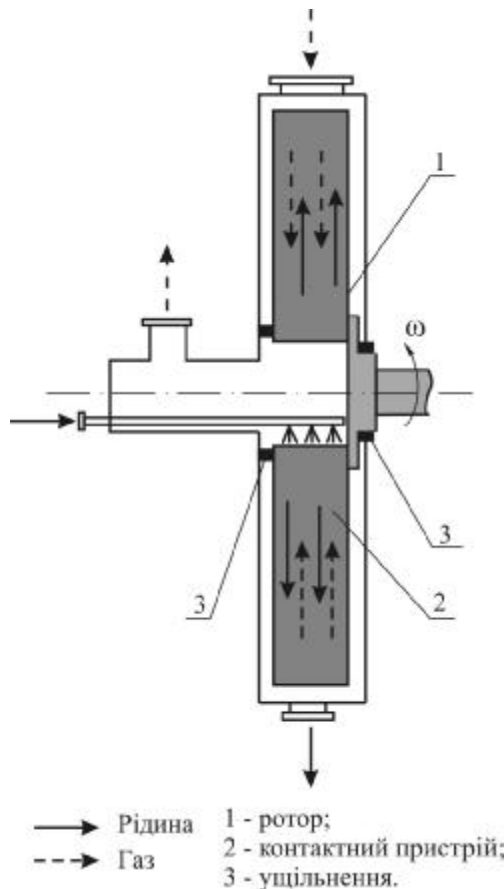


Рисунок 1 – Схема РРА

пристрої проходить ділянку стабілізації, на якій відбувається формування плівки рідини. Подальший її рух відбувається при постійній товщині плівки, яка обумовлена фізичними властивостями рідини. Ступінь розвитку поверхні контакту фаз залежить від питомої поверхні насадки і швидкості оновлення поверхні плівки рідини.

При русі плівки рідини в контактному пристрої РРА спостерігаються три режими (рис. 2):

I – режим стабілізації плівки; спостерігається при зменшенні товщини плівки по радіусу до досягнення сталої товщини плівки $\delta = const$;

II – режим руху стабільної плівки, $\delta = const$;

III – плівково-струминний режим; при $r = r_{pn}$ відбувається руйнування плівки з утворенням струменів рідини.

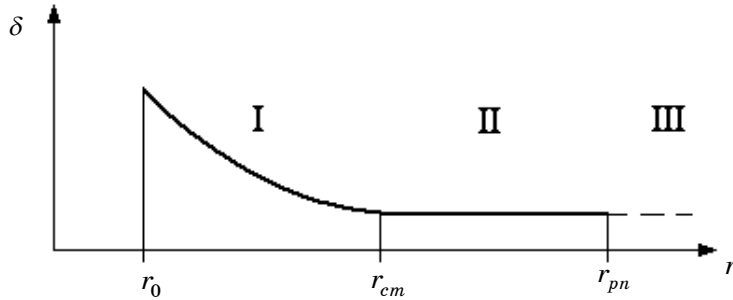


Рисунок 2 – Режими руху плівки в контактному пристрої роторного ректифікаційного апарата:

r_0 - радіус внутрішньої поверхні контактної пристрою; r_{cm} - радіус, на якому відбувається стабілізація товщини плівки; r_{pn} - радіус, на якому відбувається руйнування плівки рідини з утворенням струменів

Для визначення епюри розподілу швидкостей по товщині плівки розглянемо систему рівнянь Нав'є-Стокса та нерозривності в циліндричній системі координат.

Рівняння нерозривності

$$\frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{\partial w_z}{\partial z} + \frac{w_r}{r} = 0. \quad (1)$$

Система рівнянь Нав'є-Стокса

$$\begin{cases} w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} + w_z \frac{\partial w_r}{\partial z} - \frac{w_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\Delta w_r - \frac{w_r}{r^2} \right), \\ w_r \frac{\partial w_\varphi}{\partial r} + w_z \frac{\partial w_\varphi}{\partial z} + \frac{w_r w_\varphi}{r} = \nu \left(\Delta w_\varphi - \frac{w_\varphi}{r^2} \right), \\ w_r \frac{\partial w_z}{\partial r} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \Delta w_z, \end{cases} \quad (2)$$

де $\Delta = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ - оператор Лапласа у циліндричній системі координат.

Для завершення математичного формування задачі доповнимо рівняння гідродинаміки (2) граничними умовами:

$$w_r = 0, w_z = 0; w_\varphi = \omega r \quad \text{при } z = 0;$$

$$w_r = w_r(\delta), w_z = w_z(\delta); w_\varphi = \omega r \quad \text{при } z = \delta.$$

Припущення $w_\varphi \approx \omega r$ підтверджується експериментальними дослідженнями [1].

Беремо $\frac{\partial P}{\partial r} = 0$ та $\frac{\partial P}{\partial z} = 0$ у зв'язку з малістю відповідних складових.

Система рівнянь (2) має вигляд

$$\begin{cases} w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} + w_z \frac{\partial w_r}{\partial z} - \omega^2 r = v \left(\Delta w_r - \frac{w_r}{r^2} \right), \\ w_r \frac{\partial w_z}{\partial r} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = v \Delta w_z \end{cases}, \quad (3)$$

Розглянемо рух сталої півки рідини ($\delta = const, w_z = 0$). Умова має місце при $r_{cm} \leq r \leq r_{pn}$ (рис. 2).

Система рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності мають вигляд

$$w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} - \omega^2 r = v \left(\Delta w_r - \frac{w_r}{r^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} = 0. \quad (5)$$

З рівняння (5) маємо

$$w_r = w_{r_{cm}} \frac{r_{cm}}{r}. \quad (6)$$

З урахуванням (5) рівняння (4) має вигляд

$$v \frac{d^2 w_r}{dz^2} + \frac{w_r^2}{r} + \omega^2 r = 0. \quad (7)$$

Нехтуючи складовою $\frac{w_r^2}{r}$ внаслідок її малості, розв'язок рівняння (7) має вигляд

$$w(z) = \frac{\omega^2 r_{cm}}{v} \cdot z \cdot \left(\delta_{cm} - \frac{z}{2} \right) = \frac{\omega^2 r_{cm}}{v} \cdot \frac{\delta_{cm}^2}{2} \cdot h(2-h), \quad (8)$$

де $h = \frac{z}{\delta_{cm}}$ - безрозмірна координата, лежить в діапазоні від 0 до 1.

Осереднене по товщині півки значення швидкості її руху

$$\bar{w}(z) = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w_r dz = \frac{\omega^2 r_{cm}}{\nu} \cdot \frac{\delta_{cm}^2}{3}. \quad (9)$$

Максимальне значення швидкості руху плівки рідини дорівнює:

$$w(z)_{\max} = \frac{\omega^2 r_{cm}}{\nu} \cdot \frac{\delta_{cm}^2}{2}, \quad (10)$$

$$w(z)_{\max} = 1.5 \bar{w}(z), \quad (11)$$

$$w(z) = w(z)_{\max} h(2-h). \quad (12)$$

Епюра розподілу швидкості рідини по товщині плівки має квадратичний вигляд, що властиво для ламінарного характеру руху.

Радіальна швидкість плівки в перерізі контактної пристрою на радіусі r_{cm} дорівнює

$$w_r(r)_{cm} = \bar{w}_r(z) = \frac{\omega^2 r_{cm}}{\nu} \cdot \frac{\delta_{cm}^2}{3}. \quad (13)$$

З урахуванням (13) рівняння (6) має вигляд

$$w_r(r) = \left(\frac{\omega^2 r_{cm}}{\nu} \cdot \frac{\delta_{cm}^2}{3} \right) \frac{r_{cm}}{r}. \quad (14)$$

Таким чином, маємо:

$$w_r(r, z) = 1.5 w_r(r) \cdot h(2-h),$$

$$w_r(r, z) = 1.5 \left(\frac{\omega^2 r}{\nu} \cdot \frac{\delta_{cm}^2}{3} \right) \cdot \frac{r_{cm}}{r} \cdot h(2-h). \quad (15)$$

Рівняння (15) характеризує зміну швидкості рідини за товщиною плівки та за радіусом контактної пристрою. Зазначене рівняння справедливе для руху плівки на ділянці стабілізації.

Отримані залежності дозволяють проаналізувати перехід режиму стабілізації до сталого руху плівки.

З (13) отримаємо

$$r_{cm} = w_r(r_{cm}) \frac{3\nu}{\omega^2 \delta_{cm}^2} \quad (16)$$

Виразивши радіальну швидкість плівки через об'ємну витрату рідини L та змочений периметр внутрішнього перерізу Π_0 , з рівняння (16) отримаємо залежність для визначення ділянки стабілізації

$$r_{cm} = 2 \sqrt[3]{\frac{L}{\Pi_0} \cdot \frac{3\nu \cdot r_0}{\omega^2 \delta_{cm}^3}}. \quad (17)$$

Отримані вище залежності характеризують однофазовий рух плівки. Однак у практиці дослідження та проектування РРА виникає необхідність оцінки характеру епюри розподілу швидкості по товщині плівки за умови протитечійного руху газу.

З метою розв'язання зазначеної задачі розглянемо рух плівки рідини в контактному пристрої РРА при протитечійному русі газової фази (рис.3).

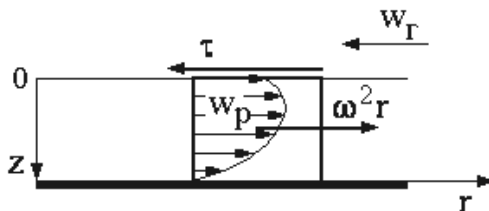


Рисунок 3 – Рух плівки рідини при протитечії газу

Запишемо умову рівноваги сил інерції, опору газової фази та в'язкісного тертя для елемента плівки:

$$\rho V \omega^2 r - \tau \delta = -\mu \delta \frac{dw_p}{dz}, \quad (18)$$

де $\tau = \frac{d_e}{4} \cdot \frac{\Delta P}{l} = \frac{\zeta \rho_z w_{відн}^2}{8}$ - дотична напруга, спричинена дією газової фази [6]; $w_{відн} = w_p + w_z$ - відносна швидкість газу.

Розв'язок рішення рівняння (18) має вигляд

$$w_p = \frac{\omega^2 r}{\nu} \cdot \frac{\delta^2}{2} (1 - h^2) - \frac{\tau \delta}{\nu \rho_p} (1 - h) \quad (19)$$

Отримана залежність (19) дозволяє враховувати вплив газу на розподіл швидкості рідини по товщині плівки.

Математичні залежності, наведені у статті, характеризують вплив фізичних властивостей взаємодіючих речовин та частоти обертання ротора на характер формування плівки рідини, поля розподілу її швидкості по перерізу при радіальному русі в контактному пристрої РРА. Наведені характеристики є одними з визначальних при оцінці умов масоперенесення та інтенсивності проходження процесу ректифікації.

SUMMARY

HYDRODYNAMICS OF THE FILM INTERACTION OF THE PHASES IN THE ROTOR RECTIFICATION DEVICES

L.D. Plyatsuk, V.I. Storozhenko, D.A. Laznenko, S.V. Sidorenko

In the article the rules of liquid film flow in a centrifugal field into a high gravity rectification vehicles (HiGee) are under observation. Authors received the equations for speed calculation of single-phase liquid film flow and for a counter-current work with a gas.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лазненко Д.О. Розробка і дослідження малогабаритних апаратів для процесів ректифікації: Дис...канд.техн.наук: 05.17.08. – Суми, 2001.

2. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии)/Под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1988. 240с.
3. Крель Э. Руководство по лабораторной перегонке / Пер. с нем. /Под ред. В.М.Олевского – М.:Химия, 1980. – 540с.
4. Олевский В.М., Ручинский В.Р. Ректификация термически нестойких продуктов – М.:Химия, 1972. – 200с.
5. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела / Л.П. Холпанов, В.Я. Шкадов.- М.: Наука.- 1990.-271 с.
6. Удыма П.Г. Пленочные испарители / Под ред. А.М. Бакластова. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1985. – 88с.

Пляцук Л.Д., доктор тех. наук, профессор,
СумДУ, м. Суми;

Стороженко В.Я., канд. тех. наук, профессор,
СумДУ, м. Суми;

Лазненко Д.О., канд. тех. наук, доцент,
СумДУ, м. Суми;

Сидоренко С.В., аспірант, СумДУ, м. Суми

Надійшла до редакції 5 жовтня 2007 р.