

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ІНЕРЦІЙНО-ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ СЕПАРАТОРІВ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Аль Раммахі Мустафа М.М., Логвин А.В., Ляпощенко О.О., Склабінський В.І.
Сумський державний університет, м. Суми

У статті розглянуто основні проблеми розрахунку газосепараторів інерційно-фільтрувального типу, проведено математичне моделювання та узагальнення результатів, які є основою для розрахунку швидкості руху газового потоку.

The paper considers the problem of calculating the basic inertial separators, filter type, mathematical modeling and synthesis results, which are the basis for calculating the velocity of the gas stream.

Ключові слова: газосепаратор, суміш, розділення, харчова промисловість.

При роботі харчових виробництв інколи виникає необхідність розділення газорідних сумішей, для дотримання вимог технологічного процесу або екологічних норм, тому теоретичні дослідження гідродинаміки потоків в ІФ сепараторах мають за мету удосконалення форми сепараційних елементів та виявлення впливу параметрів потоку на процес розділення газорідних сумішей.

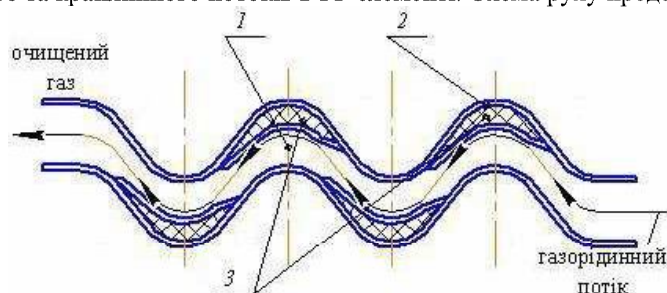
У якості основних методів розділення газорідних сумішей застосовуються сепаратори інерційного типу [1], які мають високу продуктивність, але невисоку якість розділення. Для видалення високодисперсної вологи застосовуються звичайні фільтри або фільтри-коалесцери [2], що дозволяють отримати ступінь очищення до 99,99 %, але при цьому апарати такого типу не можуть забезпечити обробку значних об'ємів сировини. Часто зустрічаються конструкції, що мають два або більше ступенів розділення [3,4] наприклад інерційна та фільтрувальна секції. Поєднання в одному апараті таких пристроїв послідовно призводить до значного збільшення гідравлічного опору та проблем при підбиранні ефективних режимів роботи. Для вирішення вищезазначених проблем були винайдені ІФ сепараційні елементи [5], які дозволяють обробляти значні об'єми газової фази, при збереженні малого гідравлічного опору і досягненні високого ступеня розділення. Оскільки цей вид організації потоків є новим, то постає необхідність у теоретичному дослідженні гідродинаміки руху потоків у елементі.

В основу теоретичного дослідження покладено такі припущення:

— внаслідок малої концентрації вологи (до 200 г/м^3) основний енергетичний вклад при русі потоків має газова фаза, тому закономірності її руху необхідно дослідити в першу чергу;

— припускаємо, що середня відстань між краплинами значно більша діаметра краплини. На підставі цього взаємодією між краплинами, а саме дифузійним та гідродинамічним впливом можна знехтувати [6].

Розглянемо рух газового та краплинного потоків в ІФ елементі. Схема руху представлена на рис. 1.



1 – газорідний потік; 2 – жалюзі; 3 – фільтрувальні елементи

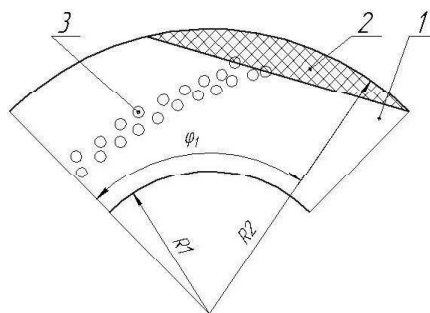
Рис. 1 – Траєкторія руху потоків у інерційно-фільтрувальному сепараційному елементі

У жалюзійний пакет підводиться газорідний потік, що містить високодисперсну краплинну рідину, який направляється в криволінійні сепараційні канали, утворені зовнішніми поверхнями гофрованих пластин 2, при проходженні яких, під дією інерційних сил, траєкторія руху краплин рідини, які рухаються зі значною швидкістю, відхиляється від скривленої лінії струму газового потоку, що обгинає криволінійні поверхні стінок каналів, і краплі рідини направляються в шар смуг 3 із волокнистого матеріалу, де внаслідок інерційного зіткнення й ефекту торкання відбувається захоплення краплин, далі, у результаті протікання вторинних процесів осадження крапель, що знов надходять на вже осаджених та капілярних

явищ у волокнистому матеріалі, відбувається збільшення середнього розміру часток дисперсної фази та проводиться наступне їхнє гравітаційне осадження. Вловлена волога стікає плівкою по внутрішніх поверхнях гофрованих пластин, і відводиться з пристрою.

Опис гідродинаміки руху газового потоку включає перелік змінних, котрі характеризують нестационарність стану системи у кожній точці досліджуваного зразка та у певний час проведення процесу. Але ключовими елементами, котрі надають основну картину процесів, є поле швидкостей. Для знаходження цих параметрів доцільно спиратися на перевірені фундаментальних залежностях, тільки тоді є достатня вірогідність отримання достовірних результатів. Тому за основу було покладено рівняння Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності [7].

Для більш коректної постановки задачі і з урахуванням особливостей конструкції досліджуваних елементів для розрахунку обрано циліндричну систему координат:



φ_1 – кутова координата; $R1$ та $R2$ – граничні радіуси каналу; 1 – газовий потік; 2 – фільтруючий елемент; 3 – крапельний потік

Рис. 2 – Схема параметрів розрахункової схеми та потоків

Для адаптації загальної задачі до конкретних умов був прийнятий ряд спрощень та припущень:

— внаслідок малого перетоку між горизонтальними шарами течії ($V_z \ll V_r, V_\varphi$) вважаємо, що течія є

двовимірна: $V_z=0, \frac{\partial}{\partial z}=0$;

— оскільки процес є стаціонарним, то параметри не залежать від часу: $\frac{\partial}{\partial t}=0$;

— враховуючи невеликий розмір ширини сепараційного каналу, зміною тиску за радіусом можна

знехтувати: $\frac{\partial P}{\partial r} = 0$;

— граничними умовами є умова прилипання: $V_\varphi(R1, \varphi) = V_\varphi(R2, \varphi) = V_r(R1, \varphi) = V_r(R2, \varphi)$;

— при розгляді рівнянь Нав'є-Стокса, враховуючи турбулентний рух, замість коефіцієнта динамічної в'язкості застосовуємо коефіцієнт турбулентної в'язкості « ε », згідно з теорією Бусінеска [8].

Беручи до уваги вищезазначені умови проводимо спрощення вихідних рівнянь та отримуємо в результаті таку систему:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_r}{r} = 0 \\ V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi^2}{r} = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{V_r}{r^2} \right), \\ V_\varphi \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{V_\varphi V_r}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} - \frac{V_\varphi}{r^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

де ε – коефіцієнт турбулентної в'язкості газу, Па·с; r – координата радіуса руху потоку, м; φ – кутова координата руху потоку, рад.

— враховуючи турбулентний режим руху газу – складові швидкості мають не лінійну залежність від геометричних параметрів (r, φ) [9]. Це дає змогу із достатньою для інженерних розрахунків точністю отримати рівняння, що описує приблизне рішення у такому вигляді:

$$V_{\varphi}(r, \varphi) = Ar^2 + Br\varphi + Cr + F\varphi \quad (2)$$

де A, B, C, F є функціями від R_1, R_2, φ, Q .

Далі, вирішуючи рівняння нерозривності, знаходимо значення для V_r :

$$V_r(r, \varphi) = -\frac{B \cdot r}{2} - F + \frac{\frac{1}{2}B \cdot R_2^2 + F \cdot R_2}{r} \quad (3)$$

Враховуючи, що об'ємна витрата газу є функцією V_{φ} маємо:

$$Q = \frac{A(R_1^3 - R_2^3)}{3} + \frac{(B\varphi + C)(R_1^2 - R_2^2)}{2} + F\varphi(R_1 - R_2) \quad (4)$$

Отримавши вирази (3) і (4), складаємо систему алгебраїчних рівнянь та отримуємо вирази для коефіцієнтів рівнянь:

$$F = \frac{6QR_2R_1}{\phi(-R_1^3 + R_2^3 + 3R_1^2R_2 - 3R_1R_2^2)} \quad (5)$$

$$A = \frac{6Q}{-R_1^3 + R_2^3 + 3R_1^2R_2 - 3R_1R_2^2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C = & -(6QR_2 - \frac{1}{-R_2^4 + r^4})(-12QR_1R_2^4 + 6R_2^3QR_1 + 4R_2^3\phi\epsilon r^2 - 12\phi\epsilon r^2R_1R_2^2 + 12R_2\phi\epsilon r^2R_1^2 \\ & + 6R_2QR^3R_1 - 4R_1^3 + 2(-36R_2^4Q^2r^6\phi^2 - 36R_2^6Q^2r^4\phi^2 + 9R_2^2Q^2r^6R_1^2 + 4\phi^2\epsilon^2r^4R_1^6 \\ & - 36Q^2R_1^2R_2^5r^3 + 9R_2^6Q^2r^2R_1^2 + 54R_2^4Q^2r^4R_1^2 + 4R_2^6\phi^2\epsilon^2r^4 + 72R_2^5Q^2r^5\phi^2 - 36r^5Q^2R_2^3R_1^2 \\ & - 72r^9Q^2\phi^2R_1 + 36r^8Q^2\phi^2R_2^2 - 72r^9Q^2\phi^2R_2 + 36r^8Q^2\phi^2R_1^2 + 72R_2^6Q^2r^3\phi^2R_1 \\ & - 24QR_1R_2^7\phi\epsilon r^2 - 144R_2^5Q^2r^4\phi^2R_1 + 36r^{10}Q^2\phi^2 + 72R_1^2R_2^6\phi\epsilon r^2 - 72QR_1^3R_2^5\phi\epsilon r^2 \\ & + 24QR_1^4R_2^4\phi\epsilon r^2 + 12R_2^6QR^3R_1\phi\epsilon - 36R_2^5QR^3R_1^2\phi\epsilon + 36R_2^4QR^3R_1^3\phi\epsilon - 12R_2^3QR^3R_1^4\phi\epsilon \\ & - 24R_2^5\phi^2\epsilon^2r^4R_1 + 60R_2^4\phi^2\epsilon^2r^4R_1^2 + 6R_2^4\phi\epsilon r^5QR_1 - 80R_2^3\phi^2\epsilon^2r^4R_1^3 + 18R_2^2\phi\epsilon r^5R_1^3Q \\ & - 24R_2\phi^2\epsilon^2r^4R_1^5 - 6R_2QR^5R_1^4\phi\epsilon - 18\phi\epsilon r^5R_1^2R_2^3Q + 60\phi^2\epsilon^2r^4R_1^4R_2 - 36R_2^6Q^2r^2\phi^2R_1^2 \\ & + 6R_2^8Q\epsilon rR_1\phi + 18R_2^6Q\epsilon rR_1 + 72R_2^5Q^2r^3\phi^2R_1^2 - 6R_2^5Q\epsilon rR_1^4\phi + 72R_2^4Q^2r^5\phi^2R_1 \\ & - 18R_2^7Q\epsilon rR_1^2\phi - 36R_2^4Q^2r^4\phi^2R_1^2 + 36r^6Q^2\phi^2R_2^2R_1^2 - 72r^7Q^2\phi^2R_2^2R_1 + 144r^8Q^2\phi^2R_1R_2 \\ & - 72r^7Q^2\phi^2R_2R_1^2)^{1/2}) + 6QR_1)/(-R_1^3 + R_2^3 + 3R_1^2R_2 - 3R_1R_2^2) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 B = & -\frac{1}{(-R_2^4 + r^4)(R_2 - R_1)^3 \phi} (-12QR_1R_2^4 + 6R_2^3QrR_1 + R_2^3\phi\epsilon r^2 - 12\phi\epsilon r^2R_1R_2^2 + 12R_2\phi\epsilon r^2R_1^2 \\
 & + 6R_2Qr^3R_1 - 4\phi\epsilon r^2R_1^3 + 2(-36R_2^4Q^2r^6\phi^2 - 36R_2^6Q^2r^4\phi^2 + 9R_2^2Q^2r^6R_1^2 + 4\phi^2\epsilon^2r^4R_1^6 - 36Q^2R_1^2R_2^5r^3 \\
 & + 9R_2^6Q^2r^2R_1^2 + 54R_2^4Q^2R_1^2 + 4R_2^6\phi^2\epsilon^2r^4 + 72R_2^5Q^2r^5\phi^2 - 36r^5Q^2R_2^3R_1^2 - 72r^9Q^2\phi^2R_1 + 36r^8Q^2\phi^2R_2^2 \\
 & - 72r^9Q^2\phi^2R_2 + 36r^8Q^2\phi^2R_1^2 + 72R_2^6Q^2r^3\phi^2R_1 - 24QR_1R_2^7\phi\epsilon r^2 - 144R_2^5Q^2r^4\phi^2R_1 + 36r^{10}Q^2\phi^2 \\
 & + 72QR_1^2R_2^6\phi\epsilon r^2 - 72QR_1^3R_2^5\phi\epsilon r^2 + 24QR_1^4R_2^4\phi\epsilon r^2 + 12R_2^6Qr^3R_1\phi\epsilon - 36R_2^5Qr^3R_1^2\phi\epsilon + 36R_2^4Qr^3R_1^3\phi\epsilon \quad (8) \\
 & - 12R_2^3Qr^3R_1^4\phi\epsilon - 24R_2^5\phi^2\epsilon^2r^4R_1 + 60R_2^4\phi^2\epsilon^2r^4R_1^4 + 6R_2^4\phi\epsilon r^5QR_1 - 80R_2^3\phi^2\epsilon^2r^4R_1^3 + 18R_2^2\phi\epsilon r^5R_1^3Q \\
 & - 24R_2\phi^2\epsilon^2r^4R_1^5 - 6R_2Qr^5R_1^4\phi\epsilon - 18\phi\epsilon r^5R_1^2R_2^3Q + 60\phi^2\epsilon^2r^4R_1^4R_2^2 - 36R_2^6Q^2r^3\phi^2R_1^2 + 6R_2^8Q\epsilon rR_1\phi \\
 & + 18R_2^6Q\epsilon rR_1^3\phi + 72R_2^5Q^2r^3\phi^2R_1^2 - 6R_2^5Q\epsilon rR_1^4\phi + 72R_2^4Q^2r^5\phi^2R_1 - 18R_2^7Q\epsilon rR_1^2\phi - 36R_2^4Q^2r^4\phi^2R_1^2 \\
 & + 36r^6Q^2\phi^2R_2^2R_1^2 - 72r^7Q^2\phi^2R_2R_1 + 144r^8Q^2\phi^2R_2R_1 - 72r^7Q^2\phi^2R_2R_1^2)^{1/2}
 \end{aligned}$$

Отримані вирази дозволяють побудувати графіки складових швидкостей у кожній точці ІФ елемента:

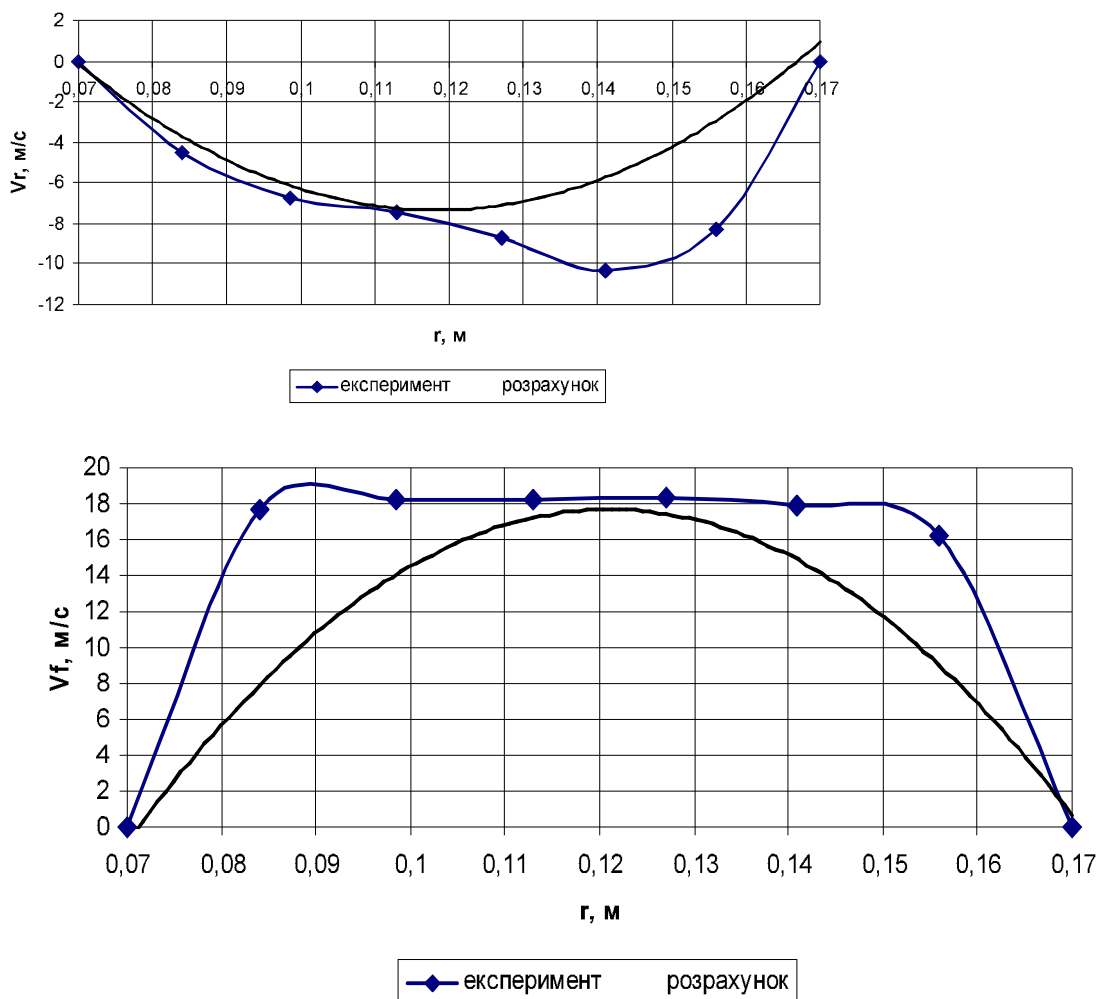


Рис. – 3 Приклади графічних залежностей складових швидкостей в поперечному перерізі ІФ елемента, де \$Q=0.414 \text{ м}^3/\text{с}\$, \$\phi_1=45^\circ\$, \$\phi=60^\circ\$, \$R_1=0.07 \text{ м}\$, \$R_2=0.17 \text{ м}\$, \$\epsilon=0,005\$, \$V_{f1}=18.04 \text{ м/с}\$.

Враховуючи все вищезазначене та отримані аналітичні і графічні залежності, ми можемо визначити гідродинамічні параметри руху газового потоку в кожній точці ІФ елемента.

Література

1. Синайский Э.Г., Лапига Е.Я., Зайцев Ю.В., Сепарация многофазных многокомпонентных систем – М., ОАО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 621 с.
2. Кириш А.А., Будька А.К., Кириш В.А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами / Российский химический журнал. 2008, Т. LI, – № 5, – С. 97–102.
3. Гужов А.И. Сбор, транспорт и хранение природных углеводородных газов / А.И. Гужов, В.Г. Титов, В.Ф. Медведев, В.А. Васильев. – М.: Недра, 1978. – 406 с.
4. Зиберт К.Г., Подготовка и переработка углеводородных газа и конденсата. – М., ОАО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 316 с.
5. Декл. пат. № 69701 А Україна, МПК 7 B01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І. Склабінський, О.О. Ляпошенко, заявка № 20031110451, заявлено 20.11.2003, надрук. 15.09.2004, Бюл. № 9, 2004.
6. Яламов Ю.И., Голикова Н.Н. Теория движения крупных капель бинарных концентрированных растворов в неоднородной по температуре трехкомпонентной газовой смеси / Журнал технической физики. – 2006, Т. 76, – № 2, С. 30-35.
7. Кочин Н.Е., Теоретическая гидромеханика, Часть 1,2 / Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. – М.: Физматгиз, – 1963. – 584 с.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 6-е. – М.: Наука, – 1987.
9. Корбут В. П., Паладиенко Ю.В. Движение и теплообмен при естественной турбулентной конвекции в плоском вертикальном канале с ассиметричным нагревом стенок / Тепло- и массообменные процессы и аппараты. – 1992, Т. 14, – № 4-6, С. 55-60.

УДК 664.046

ЛАМИНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ТОНКОГО СЛОЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПО НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В КАНАЛЕ С ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Кирилов В.Х., д-р техн. наук, профессор, Худенко Н.П., канд. техн. наук, доцент
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Рассматривается ламинарное безволновое течение тонкого слоя жидкости по наклонной поверхности при контактном гидродинамическом взаимодействии с газовым потоком. На основании уравнений пограничного слоя получены распределения скорости и давления в жидкости, а также алгебраическое уравнение третьей степени относительно толщины жидкостного слоя. Представлена графическая информация относительно влияния наклона рабочей поверхности и контактного воздействия потока газа на интегральные характеристики течения плёнки жидкости

We consider the laminar waveless for thin layer of liquid on an inclined surface in contact with the hydrodynamic interaction of the gas flow. On the basis of the boundary layer equations obtained the distribution of velocity and pressure in the liquid, as well as an algebraic equation of the third degree in the thickness of the liquid layer. Graphic information is presented regarding the influence of tilting work surface and contact exposure of the gas flow on the integral characteristics of the flow of a liquid film

Ключевые слова: плёнка жидкости, уравнения пограничного слоя, ламинарное течение жидкости и турбулентное движение газа, касательное и нормальное напряжения, коэффициент гидравлического сопротивления.

1 Теоретические исследования

Одним из прогрессивных способов взаимодействия фаз в контактных теплообменных аппаратах является осуществление контактирования фаз при пленочных течениях жидкостей. Пленочные тепло- и массообменные аппараты получили широкое распространение во всех отраслях пищевой промышленности [2].

В общем случае математическая модель течения пленки жидкости в контакте с газовым потоком (рис.1) представляется следующей системой уравнений и граничных условий [1]:

уравнения движения пленки жидкости