

Піддубний В.А.,  
Соколенко А.І.,  
Лензійон С.В.,  
Шевченко О.Ю.

*Національний університет  
харчових технологій*

УДК 621.798

## ГІДРОДИНАМІЧНІ МЕТОДИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ І ГОМОГЕНІЗАЦІЇ СЕРЕДОВИЩ

Значна кількість середовищ харчових, мікробіологічних, фармацевтичних та хімічних виробництв знаходяться в стані масо- та теплообміну, які забезпечуються певними рівнями гідродинамічних станів. Підвищення останніх досягається за рахунок введення енергетичних потоків, які трансформуються в кінцевому результаті у механічні впливи [1–4].

Завданням цього дослідження визначено оцінку гідродинамічних методів впливу на масообмінні процеси у випадках створення штучних рідинних потоків з генеруванням потужних інерційних впливів.

Першопричиною силової взаємодії між твердими тілами, твердим тілом та газом або рідиною, газом та рідиною є наявність потенціального поля. Так гравітаційне поле поруч з іншими фізичними полями і речовиною є однією з форм матерії. Важливою особливістю гравітаційного поля є те, що на розміщену в ньому матеріальну точку діє сила тяжіння, прямопропорційна масі цієї точки.

Векторною характеристикою гравітаційного поля є його напруженість  $\vec{g}$ , яка визначається відношенням сили тяжіння  $\vec{F}$ , що діє на матеріальну точку, до величини її маси  $m$ .

Еквівалентом вектора напруженості  $\vec{g}$  в полі інерційних сил виступає вектор прискорення. Значна кількість технологічних процесів харчових виробництв, основою яких є тепло- та масообмін, здійснюються в потенціальних полях, завдяки яким варіюються тиски. Стосовно твердих тіл такі варіації можливі за рахунок дії зовнішніх сил і перерозподілу тисків між іншими тілами за незмінних показників силового потенціального

поля.

Стосовно рідин і газів зміни тисків потребують виконання однієї з двох умов.

Умова перша. У рідині, газі або газорідному середовищі, що перебувають у потенціальному полі, створюються локальні потоки, в яких у відповідності з рівняннями Бернуллі та Нав'є-Стокса відбувається перерозподіл між потенціальною і кінетичною енергією і відповідно тисками. Такий же перерозподіл тисків супроводжує взаємодію рідин та газів при обтіканні ними твердих тіл, оскільки подібна взаємодія приводить до виникнення потоків з відносними швидкостями [5–6].

На цій основі ґрунтується значна кількість технологічних прийомів, до числа найбільш важливих з них відносяться використання аеродинамічного профілю крила літака, форма сучасного автомобіля та інших засобів транспорту, профілі гвинтів літака і гелікоптера, профілі споруд, лопатей мішалок, пристрої для створення кавітаційних ефектів, ежекційні пристрої тощо.

Умова друга. Створюється герметизація локального об'єму рідини або газу і має прояв збільшення в ньому масової кількості середовища за рахунок зовнішніх силових факторів через тверді тіла з відповідними енергетичними витратами або зміна локалізованого герметичного об'єму, або у статичний об'єм здійснюється передавання (відведення) теплової енергії. В певних випадках може бути і комбінація різних прийомів (двигуни внутрішнього згорання, компресори тощо).

Стосовно першої умови звернемо увагу

на те, що вирішальне значення у змінах тисків мають характеристики потенціального поля.

У широкому використанні знаходяться пристрої, у яких реалізується створення штучних силових полів на основі відцентрових сил (сепаратори, класифікатори, центрифуги, відцентрові насоси тощо). Принцип їх дії ґрунтується на основі переміщення потоків по криволінійних траєкторіях, за яких виникають нормальні прискорення

$$a^n = \frac{v^2}{R}, \quad (1)$$

де  $R$  – радіус кривизни траєкторії.

За відомої маси  $m$  величина відцентрової сили інерції складає

$$F_{\text{від}} = ma^n. \quad (2)$$

Переміщення матеріальних тіл або потоків по криволінійних траєкторіях означає наявність їх матеріального зв'язку з центрами кривини у вигляді ланок або у вигляді поверхонь контактування криволінійної форми.

За такої взаємодії в насосах, сепараторах, центрифугах тощо має місце перехід в русі потоків з меншого радіуса  $R_1$  на більший  $R_2$ , що визначає роботу відцентрових сил

$$A = \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{g} \omega^2 R dR = \frac{\omega^2 R_2^2 - \omega^2 R_1^2}{2g} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}.$$

де  $\omega$  – кутова швидкість потоку;  $u_1$  та  $u_2$  – колові швидкості потоку.

Останнє рівняння записане для одиничної ваги потоку.

Таким чином, потенціальна енергія, що створюється робочим колесом насоса, складається з роботи відцентрових сил

$$\left( \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} \right) \text{ і перетворення частини кінетичної}$$

енергії при відносному переміщенні потоку (по

лопатях) в потенціальну  $\left( \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} \right)$ , де  $w_1$  та

$w_2$  – відносні швидкості відповідно на радіусах  $R_1$  та  $R_2$ .

Силова взаємодія між потоками і трубами, у яких вони формуються, має розбіжності стосовно прямолінійних і криволінійних ділянок. У відповідності з умовою нерозривності потоку ідеальної рідини в циліндричній трубі зі сталим поперечним перерізом швидкості приймаються однаковими у всіх точках останнього, а для нестискуваної рідини швидкість однакова також для всіх перерізів.

За випадку руху нестискуваної в'язкої рідини в циліндричній трубі потік на її початковій ділянці складається з двох частин – граничного шару біля стінок і незбуреного ядра, в межах якого швидкість рідини однакова. З віддаленням від початку труби товщина пограничного шару збільшується до тих пір, поки на відстані  $l_{\text{стаб}}$  він не заповнить весь поперечний переріз. За межами ділянки  $l_{\text{стаб}}$  гідродинамічної стабілізації течія потоку стає стабілізованою і їй відповідає однакове по всіх перерізах поле швидкостей рідини.

Довжина  $l_{\text{стаб}}$  зростає зі збільшенням розмірів труби і числа Рейнольдса. Так для ламінарного потоку в циліндричній трубі

$$l_{\text{стаб}} \sim R \cdot Re,$$

де  $R$  – радіус труби.

У випадку стабілізованої ламінарної течії нестискуваної рідини у циліндричній трубі, вісь якої збігається з віссю прямокутної декартової системи координат  $Oz$ , швидкість рідини  $v$  у всіх точках паралельна осі  $Oz$ , тобто

$$v_x = v_y; \quad v_z = v.$$

З умови нерозривності визначається

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0; \text{ тобто } v = v(x, y).$$

З рівняння Нав'є-Стокса витікає

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{dP}{dz} = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = \text{const} = -\frac{\Delta P}{l},$$

де  $\Delta P$  – падіння тиску на ділянці труби довжиною  $l$ .

Для круглої циліндричної труби останню умову запишемо у формі

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( r \frac{dv}{dr} \right) = -\frac{\Delta P}{\mu l},$$

де  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  – відстань від осі труби.

Тоді розподіл швидкостей по перерізу труби відповідає закону

$$v(r) = \frac{\Delta P}{4\mu l} (R^2 - r^2),$$

де  $R$  – радіус труби;  $\mu$  – динамічна в'язкість.

Переміщення рідинних потоків по криволінійних траєкторіях супроводжуються створенням полів відцентрових сил. При цьому відцентрова сила діє на кожну матеріальну частинку потоку. Сукупність відцентрової сили і реакції оболонки приводить до виникнення локальної зони тиску. Оскільки дія і протидія між собою рівні і взаємно компенсовані, то це

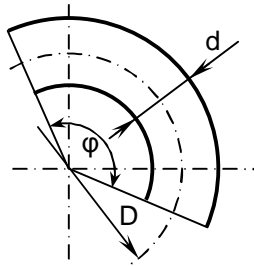


Рис. 1. Схема до визначення геометричних параметрів відводу

означає, що підвищене поле тиску виникає тільки у зоні поля відцентрових сил.

Зовнішнім наслідком існування підвищеного поля тиску є збільшення падіння тиску  $\Delta P$  по довжині криволінійної труби, оскільки сили тертя між потоком і стінкою

$\varphi^\circ$	20	30	45	60	90	110	130	150	180
A	0,31	0,45	0,6	0,78	1	1,13	1,2	1,28	1,4
D/2d		1	2	4	6	15	30	50	
B		0,21	0,15	0,11	0,09	0,06	0,04	0,03	

За прийнятих значень кінематичних параметрів напруженість поля сил інерції може значно перевищувати аналогічний показник гравітаційного потенціального поля. Наприклад, за значень параметрів  $v = 5$  м/с;  $d = 0,1$  м;  $D = 0,2$  м одержуємо

$$a^n = \frac{2v^2}{D} = \frac{2 \cdot 25}{0,2} = 250 \text{ м/с}^2,$$

а величина сили інерції від маси  $m$ , що знаходиться на криволінійній ділянці визначається за формулою (2).

При цьому параметр  $F_{\text{від}}$  визначається як результуюча сил інерції, за якою можливо визначити значення розподіленого тиску.

Таким чином, включення в магістраль криволінійних ділянок супроводжується виникненням додаткових силових дій, зміною полів тиску в потоках, перерозподілом полів швидкостей. Важливо, що перехід від прямолінійної на криволінійну ділянку здійснюється за умови миттєвого виникнення прискорення  $a^n$ , що відповідає явищам, відомим в динаміці як м'які удари.

З наведених даних видно, що величина

зростають. Так за рекомендаціями [1, 2] втрати тиску у зігнутій трубі змійовику

$$\Delta P_{\text{зм}} = \Delta P_{\text{пр}} \Psi,$$

де  $\Delta P_{\text{пр}}$  – втрати тиску в прямій трубі.

Безрозмірний поправочний коефіцієнт  $\Psi > 1$  визначається за формулою

$$\Psi = 1 + 3,54 \frac{d}{D},$$

де  $d$  – внутрішній діаметр труби;  $D$  – діаметр змійовика.

Іншим прикладом врахування проявів додаткових тисків в полі відцентрових сил є визначення коефіцієнту місцевого опору  $\xi$  для відводів круглого перерізу (рис. 1).

$$\xi = AB,$$

де  $A$  та  $B$  – функції геометричних параметрів.

стрибка прискорення складає  $250 \text{ м/с}^2$ , а за підвищення швидкості до  $10 \text{ м/с}$  прискорення досягне величини  $1000 \text{ м/с}^2$ . Цим двом значенням прискорень відповідають додаткові тиски від сил інерції  $0,08$  та  $0,32$  МПа.

Вказані зміни фізичних параметрів можуть мати прояв як на кілька секунд, так і діяти в подовженому часі. За використання відводів з зазначеною величиною кута  $\varphi$  час впливу обмежений, а у змійовику час впливу суттєво зростає.

За умови транспортування газорідинної суміші в змійовику має місце інтенсифікація масообміну та теплообміну. Зміни напруження силового поля та тисків у своїй взаємодії приводять до летальних ефектів по мікрофлорі, руйнують оболонки клітин рослинного походження тощо.

За співрозмірних значень напружень гравітаційного поля і поля сил інерції принципове значення може мати орієнтація площини розташування криволінійної траєкторії потоку

Так за горизонтального розташування у відповідності з принципом суперпозиції сумарна напруженість потенціальних полів визначається їх геометричною сумою, тобто

$$\bar{a}_{\text{сум}} = \bar{g} + \bar{a}^n,$$

яка залишається сталою на всій ділянці, якщо сталим є  $\bar{a}^n$ . За вертикальної орієнтації вказаної площини силова дія  $F_{\text{сум}}$  має максимальне значення в точці А (рис. 2), а мінімальне – в точці С.

Якщо за модулями  $F_i$  та  $mg$  рівні, то в точці С досягається стан невагомості.

Частота імпульсів напруженості поля інерційних сил може змінюватися за рахунок чергування прямолінійних і криволінійних

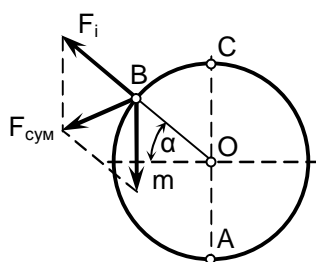


Рис. 2. Схема до визначення сумарних силових дій гравітаційного і інерційного полів за вертикальної орієнтації площини траєкторії потоку

ділянок контурів (рис. 3). Перехід потоку через критичні точки 1, 2, 3 та 4 в часі може регулюватися за рахунок довжини відповідних ділянок. За вказаних умов існування стаціонарних полів швидкості стає неможливим і проходження можливої критичної точки супроводжується їх перебудовою в часі, що відповідає перехідним процесам.

**Висновок.** Наведений огляд особливостей гідродинаміки рідинних і газорідних потоків приводить до висновку про важливість таких взаємопов'язаних кінематичних параметрів як швидкість і прискорення з динамічним параметром тиску. Наявність поперечних та поздовжніх полів швидкості означає присутність прискорень і сил інерції.

Разом з тим останні входять складовими до критеріїв гідродинамічної подібності (критерії Фруда ( $Fr$ ), Ейлера ( $Eu$ ), Рейнольдса ( $Re$ )). Таким чином, вплив на газорідні потоки за рахунок зміни їх кінематичних параметрів слід вважати доступним чинником інтенсифікації процесів масообміну.

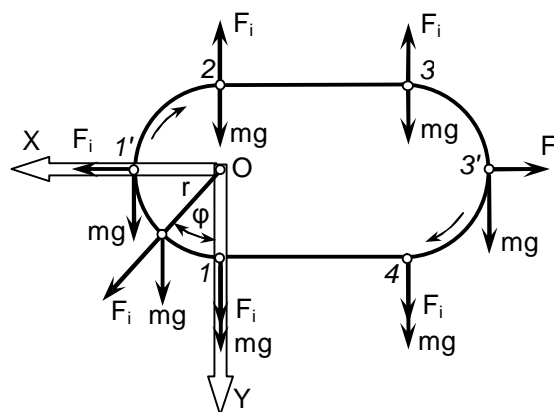


Рис. 3. Схема траєкторії потоку з 4-ма імпульсами впливів за вертикальної орієнтації контуру

### Література

1. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 575 с.
2. Соколенко А.И., Украинец А.И., Яровой В.Л. и др. Справочник специалиста пищевых производств. – К.: АртЭк, 2003. – 432 с.
3. Дубінін О.О., Переяславцев О.М., Тахістова Г.О. Визначення динамічних параметрів висхідних потоків газорідної суміші у шарі рідини // Харчова промисловість. – К.: НУХТ, – 2003. – № 3. – с. 92-94.
4. Єрмаков П.П. Автоколівальна масообмінна апаратура харчової промисловості. Автореф. дисерт. на здобуття ступеня д.т.н. – К.: 1995. – 28 с.
5. Єрмакова О.П. Ежекційно-циклонний пристрій для очищення води. Автореф. дисерт. на здобуття ступеня к.т.н. – Дніпропетровськ: – 2001. – 19 с.
6. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологи. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.