

## РОЗРАХУНОК ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАКРУЧЕНИХ ПОТОКІВ У ВИХРОВИХ ГРАНУЛЯТОРАХ АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ

**В.І. Склабінський, А.Є. Артюхов**

*Сумський державний університет, м. Суми*

*Стаття присвячена результатам приблизного рішення рівнянь Нав'є-Стокса та нерозривності потоку стосовно випадку вихрового руху газового потоку у вісесиметричному конічному каналі. Отримано формули для обчислення складових повної швидкості газового потоку. Результати аналітичного розрахунку являють підґрунтя для створення моделі двофазного потоку у вихровому грануляторі.*

### ВСТУП

Впровадження в сучасну хімічну техніку малогабаритних апаратів з високою інтенсивністю протікання процесів та питомою потужністю – зокрема обладнання вихрового типу – перспективний напрямок розвитку такої галузі хімічної промисловості, як технологія отримання гранульованих продуктів [1-3], що дозволяє знизити висоту грануляційних веж та зменшити час перебування гранул у робочому просторі апарату. Проведено аналіз методів вдосконалення гідродинамічних умов протікання процесу гранулювання у вихровому псевдозрідженому шарі [4] та серія експериментальних досліджень [5,6], які дозволили запропонувати до впровадження в промислову технологію нового способу гранулювання з використанням вихрового обладнання [7,8].

### ПОСТАВЛЕННЯ ЗАВДАННЯ

Надзвичайно важливим питанням, що постає перед дослідниками є проблема математичного опису гідродинаміки руху фаз у вихрових апаратах.

З огляду на те, що гідродинаміку двофазного потоку в робочому просторі гранулятора визначає потік газу, основною задачею даної роботи є визначення гідродинамічних параметрів газу на базі аналітичного вирішення рівняння нерозривності руху та динамічного рівняння руху Нав'є – Стокса.

Теоретичні основи руху газу у робочій порожнині вихрового гранулятора спираються на рівняння нерозривності руху та динамічне рівняння руху Нав'є – Стокса [9].

Отримання полів швидкостей колової, радіальної та витратної складової повної швидкості закрученого потоку в робочому просторі вихрового гранулятора зваженого шару може бути вирішене чисельним методом та засноване на розв'язанні рівнянь, що займають проміжне положення між повними рівняннями руху Нав'є – Стокса та рівняннями прикордонного шару, так званих RNS-рівнянь [10].

Незважаючи на достатньо широке застосування обладнання з використанням закручених потоків фаз [11], а також на значну кількість теоретичних експериментальних досліджень [12-14], існує ряд питань щодо руху взаємодіючих фаз, які не мають досить строгого математичного опису та у повній мірі обґрунтованого рішення. В цілому є підстави вважати задачу визначення полів швидкостей у закрученому турбулентному потоці в конічних каналах при довільному законі розподілу складових повної швидкості на даний час не вирішеною в загальному вигляді [15].

### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

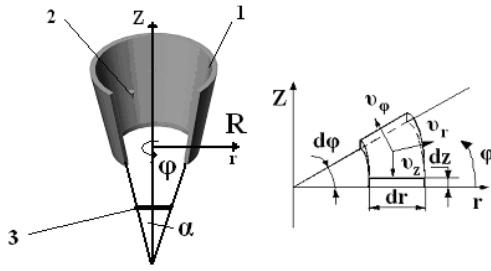


Рисунок 1- Схема елементарного об'єму газу в циліндричній системі координат  $(r, \varphi, z)$ : 1 – робочий простір пристрою; 2 – елементарний об'єм газу; 3 – газорозподільвач;  $dr, d\varphi, dz$  – елементарні прирости,  $V_r, V_\varphi, V_z$  – радіальна, окружна й вісьова складові швидкості руху газу відповідно;  $\alpha$  – половина кута розкриття дифузора

Для отримання приблизного рішення запишемо рівняння Нав'є-Стокса для випадку руху газового потоку в симетричному дифузори, доповнюючи його рівнянням нерозривності потоку [16]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} = \\ & = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + E \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{v_r}{r^2} \right) \\ & \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} - \frac{v_r v_\varphi}{r} = \\ & = F_\varphi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + E \left( \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right) \\ & \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \\ & = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + E \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (2)$$

де  $E$  – коефіцієнт турбулентної в'язкості у відповідності до гіпотези Бусінеска [13]

Основні спрощення, що отримані на основі теоретичних та експериментальних наукових праць та прийняті для вирішення поставленої задачі [17]:

- характер течії газу вісесиметричний;
- рух газу в апараті прийнято усталеним;
- для конкретного випадку задані закон зміни витратної складової швидкості та тиску вздовж окремих вісей координат.

Проаналізуємо складові системи рівнянь, виходячи з прийнятих вище спрощень та передумов.

З урахуванням вісесиметричності руху газу в робочій порожнині вихрового гранулятора

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0 \quad (3)$$

Зважаючи на усталений рух газу в апараті

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} = 0; \frac{\partial v_\varphi}{\partial t} = 0; \frac{\partial v_z}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

Дією масових сил у випадку руху елементарного об'єму газового потоку, що

розглядається, можна зневажати [16], тобто

$$\sum F_r = 0; \sum F_\varphi = 0; \sum F_z = 0. \quad (5)$$

Отже, система рівнянь (1) та рівняння нерозривності (2) набуває вигляду з урахуванням зменшення величини  $V_z$  уздовж вісі  $z$

$$\begin{cases} v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\varphi^2}{r} = E \left( \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right) \\ v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} - \frac{v_r v_\varphi}{r} = E \left( \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r^2} \right) \\ v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = E \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{V_r}{r} = 0 \quad (7)$$

З допущення щодо постійності вісьової складової при малих кутах  $\alpha$  відкриття дифузора швидкості вздовж  $r$ , маємо

$$V_z = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (8)$$

Для кінчного робочого простору вихрового гранулятора залежність радіуса твердої стінки від висоти має наступний вигляд:

$$R = \operatorname{tg} \varphi \cdot z \quad (9)$$

Підставивши (9) в (8), отримуємо:

$$V_z(z) = \frac{Q}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot z^2} \quad (10)$$

Тоді рівняння нерозривності потоку (7) має наступний вигляд:

$$\left( \frac{\partial}{\partial r} V_r(z, r) \right) + \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot z^3} + \frac{V_r(z, r)}{r} = 0 \quad (11)$$

Вирішуємо (11) відносно  $V_r$ :

$$V_r(z, r) = \frac{-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot z^3} + F_1(z)}{r}, \quad (12)$$

де значення  $F_1(z)$  визначається за початкових умов  $V_r(z, r) = 0$  при  $R = \operatorname{tg} \varphi \cdot z$

$$F_1(z) = \frac{Q}{z \cdot \pi} \quad (13)$$

Після підстановки (14) рівняння (13) має вигляд:

$$Vr(z, r) = \frac{-\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi}}{r} \quad (14)$$

Припускаємо, що уподовж радіуса колова швидкість змінюється за квадратичною залежністю, а уподовж вісі – за лінійною залежністю. Припущення про характер зміни колової швидкості спирається на результати досліджень вихрових вісесиметричних потоків [11,13]. Крім того, при  $r=0$  та  $z=0$  значення  $V_\varphi=0$ , тобто вільний член загального рівняння другого ступеня дорівнює 0. Шукаємо рішення у вигляді:

$$V_\varphi(z, r) = Ar^2 + Bzr + Cr + Fz \quad (15)$$

Тоді друге рівняння системи (6) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} & \frac{\left( -\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi} \right) \cdot (2Ar + Bz + C)}{r} - \frac{2 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot \operatorname{tg}^4 \varphi \cdot z^5} + \\ & + \frac{\left( -\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi} \right) \cdot (Ar^2 + Bzr + Cr + Fz)}{r^2} = \quad (16) \\ & = E \left( 2A + \frac{2Ar + Bz + C}{r} - \frac{Ar^2 + Bzr + Cr + Fz}{r^2} \right) \end{aligned}$$

Значення А, В, С і F отримуємо з урахуванням наступних граничних умов: на стінці конуса  $V_\varphi=0$ ; на половині радіусу завихрювача  $V_\varphi = V_{\varphi 1}$ ; у центрі конусу  $V_\varphi=0$ .

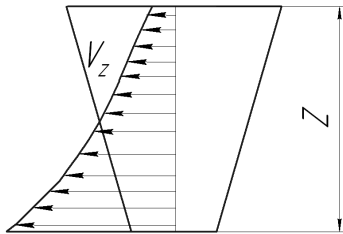


Рисунок 2 – Характер розподілу вісьової швидкості газового потоку за висотою пристрою

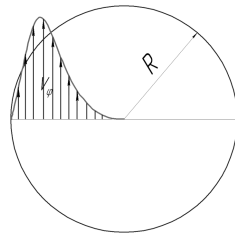


Рисунок 3 – Характер розподілу колової швидкості газового потоку за радіусом пристрою

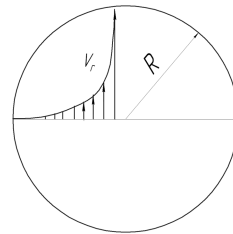


Рисунок 4 – Характер розподілу радіальної швидкості газового потоку за радіусом пристрою

Отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned}
& \left( -\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi} \right) \cdot (2Ar + Bz + C) - \frac{2 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi^4 \cdot z^5} \\
& + \frac{\left( -\frac{Q \cdot r^2}{\pi \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^3} + \frac{Q}{z \cdot \pi} \right) \cdot (Ar^2 + Bzr + Cr + Fz)}{r^2} - \\
& E \left( 2A + \frac{2Ar + Bz + C}{r} - \frac{Ar^2 + Bzr + Cr + Fz}{r^2} \right) = 0 \\
& Az^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 + Bz^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi + Cz \cdot \operatorname{tg} \varphi + Fz = 0 \\
& Fz = 0 \\
& V_{\varphi 1} = \frac{1}{4} A_1 z^2 \cdot \operatorname{tg} \kappa^2 + \frac{1}{2} B_1 z^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi + \frac{1}{2} C_1 z \cdot \operatorname{tg} \varphi + F_1 z
\end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Рішення системи (17) відносно А, В, С і F має вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
& F = 0 \\
& B = -(-4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot r^2 - 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot r + 4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 + \\
& + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot r + Q^2 \cdot rz_1^2 - 2Q^2 \cdot rz^2) / \\
& /(\operatorname{tg} \varphi \cdot \pi \cdot z^2 (2z_1^2 \operatorname{tg} \varphi \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\
& + 3z_1^2 \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - 2z^5 \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot Q - \\
& - 3z^4 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)) \\
& A = \frac{2Q^2 \cdot r}{\operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot z^2 (-2Q \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot z \cdot r - 3Q \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot z^2 \cdot r + 2Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot z^3 + 3Q \cdot r^3 + 3E \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^3 \cdot r)} \\
& C = (4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot r - 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot r - \\
& - 4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot r^2 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 - Q^2 \cdot rz_1^2) / (\operatorname{tg} \varphi \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \operatorname{tg} \varphi \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\
& + 3z_1^2 \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - \\
& - 2z^3 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot Q \cdot r^2 - 3z^4 \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r))
\end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Вираз для обчислення значення колової швидкості у такому разі має наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
V_{\varphi}(z,r) = & \frac{2Q^2 \cdot r^3}{\pi \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^2 (-2Q \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot z \cdot r^2 - 3Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^2 + 2Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 z^3 + 3Q \cdot r^3 + 3E \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 z^3 r)} \\
& - ((-4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot r^2 - 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot r + 4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 + \\
& + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot r + Q^2 \cdot r \cdot z_1^2 - 2Q^2 \cdot r \cdot z^2) r) / (\operatorname{tg} \varphi \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\
& + 3z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - 2z^5 \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot Q - \\
& - 3z^4 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r)) + \\
& + ((4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^5 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi^2 \cdot z^5 \cdot E \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot r - 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^4 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot r - \\
& - 4V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^3 \cdot Q \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot r^2 + 6V_{\varphi 1} \cdot \pi \cdot z^2 \cdot Q \cdot r^3 - Q^2 \cdot r \cdot z_1^2) r) / (\operatorname{tg} \varphi \cdot \pi \cdot z (2z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot z \cdot Q \cdot r^2 + \\
& + 3z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot z^2 \cdot Q \cdot r - 2z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot z^3 \cdot Q - 3z_1^2 \cdot Q \cdot r^3 - 3z_1^2 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot z^3 \cdot E \cdot r - 2z^5 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot Q \cdot r^2 - \\
& - 3z^4 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot Q \cdot r + 2z^5 \cdot \operatorname{tg} \varphi^3 \cdot Q + 3z^2 \cdot Q \cdot r^3 + 3z^5 \cdot \operatorname{tg} \varphi^2 \cdot \pi \cdot E \cdot r))
\end{aligned} \tag{19}$$

### РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

На рисунку 5 показано залежність зміни  $V_r$  уздовж  $r$  при  $z=0,8$  м.

На рисунку 6 показано залежність зміни  $V_{\varphi}$  уздовж  $r$  при  $z=0,652$  м, радіусі  $r=0,15$  м,  $\alpha=13^\circ$  при швидкості газу в перетині де розташовано завихрювач 9 м/с.

При підстановці отриманих рівнянь (14) та (19) в друге рівняння системи (6) похибка отриманого результату складає до 10 %, що припустимо для розрахунку [18]. Отримана похибка при перевірці розрахункових формул пояснюється накопиченням окремих похибок при встановленні допущень та вирішенні системи рівнянь (18) та рівнянь (14) і (19).

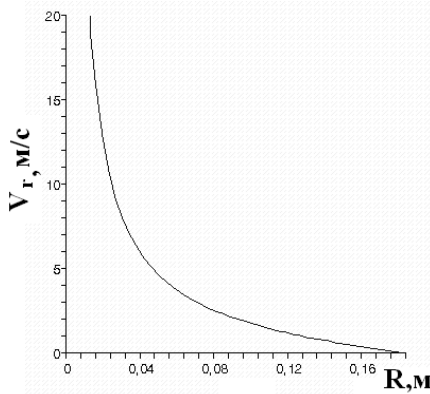


Рисунок 5 - Залежність  $V_r=f(z,r)$

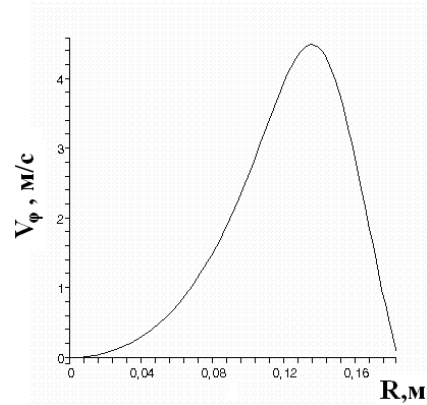


Рисунок 6 - Залежність  $V_{\varphi}=f(z,r)$

### ВИСНОВКИ

Розглянуте теоретичне підґрунтя гідродинамічних умов процесу у вихровому потоці теплоносія має комплексний характер, тому розгляд окремих складових двофазного потоку неможливе без урахування дії кожної з фаз одна на одну.

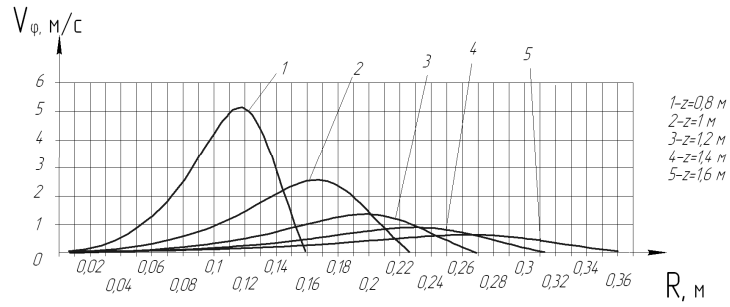


Рисунок 7 – Характер зміни колової швидкості газового потоку в залежності від висоти робочого простору вихрового гранулятора (при  $\alpha=13^\circ$ ,  $Q=0,63 \text{ м}^3/\text{с}$ )

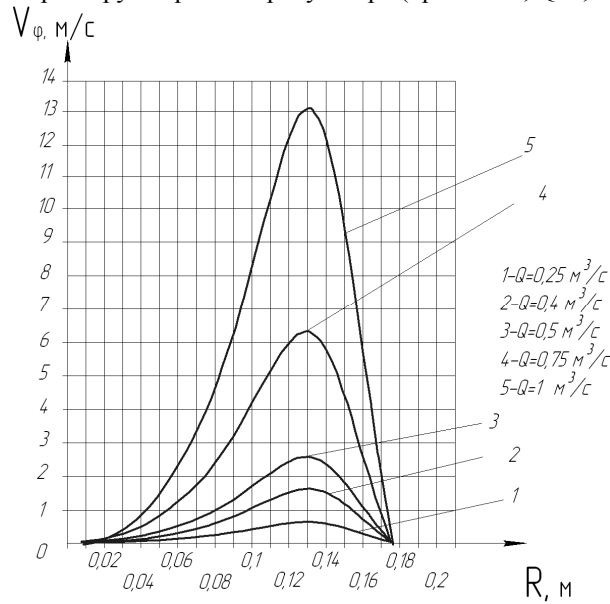


Рисунок 8 – Характер зміни колової швидкості газового потоку в залежності від витрати теплоносія (при  $\alpha=13^\circ$ ,  $z=0,8 \text{ м}$ )

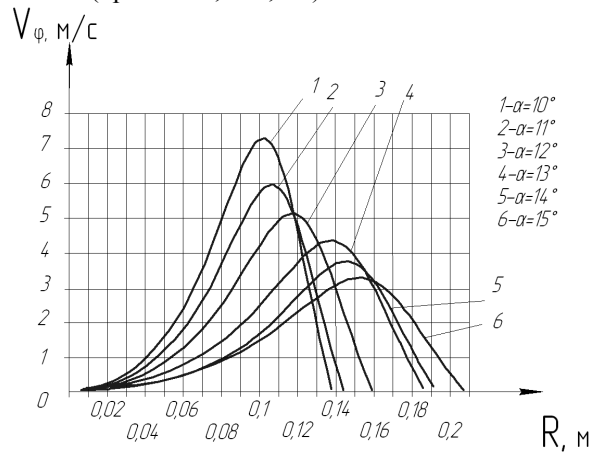


Рисунок 9 – Характер зміни колової швидкості газового потоку в залежності від кута розкриття конуса (при  $Q=0,63 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $z=0,8 \text{ м}$ )

Створення математичної моделі, де буде враховано гідродинамічні параметри газового потоку, його вплив на рух гранул та взаємозв'язок між кожною складовою

двофазного потоку, зважаючи на експериментальні дослідження [7], є одним з етапів реалізації високоінтенсивного процесу гранулоутворення в малогабаритних апаратах вихрового типу та дозволяє створити методику розрахунку гідродинаміки однофазної, а потім і двофазної течії у робочому просторі вихрового гранулятора.

## SUMMARY

*The article to the results of approximate decision of the Navier-Stokes equalizations and indissolubility of stream in relation to the case of gas stream vortical motion in a symmetric to the axis conical channel is devoted. Formulas for the calculation of constituents of gas stream complete speed are got. The results of analytical calculation represent basis for creation of model of diphasic stream in vortical type granulator.*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.И.Склабинский, А.Е.Артюхов. Вопросы энергосбережения при внедрении в производство малогабаритного грануляционного оборудования // "Вісник СумДУ", №5 (89) 2006. – с 76-79.
2. Артюхов А.Є., Склабинський В.І. Енергоощадні технології у хімічному виробництві. Малогабаритні вихрові гранулятори // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали четвертої Міжнародної науково-практичної конференції. Львів, 4-5 квітня. Зб. наукових статей, - Львів, ЛьЦНТЕІ, 2007. - с. 13-17.
3. А.Е. Артюхов, В.И. Склабинский. Высокоэффективные вихревые аппараты в малотоннажных производствах гранулированных продуктов// Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: тезисы докладов XX Международной научно-технической конференции «Реактив-2007». – Минск, 2007. – с.91.
4. Артюхов А.Є., Склабинський В.І. Деякі напрями зменшення габаритних розмірів грануляційного обладнання в сучасній хімічній промисловості. // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Дни науки - 2006».Том 33. – Хімія та хімічні технології. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2006. – с. 34-37.
5. В.І.Склабинський, А.Є.Артюхов. Малогабаритні апарати змінного перетину з вихровим псевдозрідженим шаром. Вплив розподільних пристроїв на рух гранул // Хімічна промисловість України. — 2006. — №2(73). — с. 55-59.
6. А.Є. Артюхов, В.М. Маренок, В.І. Склабинський. Дослідження умов формування вихрового псевдозрідженого шару в малогабаритних масообмінних апаратах // "Вісник СумДУ", №3' 2007. – с 10-17.
7. Патент №29950 Україна МПК (2006) B01J2/16. Пристрій для гранулювання рідкого матеріалу/ Артюхов А.Є., Склабинський В.І., Стеценко А.С. - №u200512066; Заявлено 15.12.2005; Надрук 11.02.2008, Бюл. №3, 2008р.
8. Патент №87254 Україна МПК (2006) B01J2/16. Спосіб гранулювання рідкого матеріалу та пристрій для його здійснення / Артюхов А.Є., Склабинський В.І. - №a200608137; Заявлено 20.07.2006; Надрук 12.05.2008, Бюл. №9, 2008р.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1970. — 904 с.
10. Математическое моделирование процесса движения гранул в вихревых аппаратах с малой высотой рабочей камеры // "Вісник СумДУ", №12 (96) 2006. – с 5-11.
11. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков. – Киев.: Наукова думка, 1989. – 192 с.
12. Шукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
13. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. – Новосибирск.: Наука, 1981. – 366 с.
14. Ахмедов Р.Б. Аэродинамика закрученной струи. – М.: Энергия, 1997. – 238 с.
15. Константінов Ю.М., Гіжа О.О. Технічна механіка рідини і газу: Підручник. – К.:Вища шк., 2002. – 277 с.: іл.
16. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика, ч. II. – М., Физматгиз, 1963. – 728 с., с илл.
17. Артюхов А.Є. Теоретичні основи дослідження руху газового потоку у вихровому грануляторі // Збірник тез доповідей XXII-й наукової конференції країн СНД "Дисперсные системы" – Одеса, 18-22 вересня 2006 р – с. 40-41.
18. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. – Л.: Химия, 1971. – 824с.

Склабинський, В.І. Розрахунок гідродинамічних параметрів закручених потоків у вихрових грануляторах аналітичним методом [Текст] / В.І. Склабинський, А.Є. Артюхов // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2008. — №3. — С. 60-67.