

## ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЕФОРМУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

*Наведено результати аналітичного дослідження формування високошвидкісного різального двофазного струменя з локальним закручуванням твердої фази. Визначено основні фактори, що впливають на продуктивність устаткування для гідроабразивного різання матеріалів та раціональні конструктивні параметри робочого органу.*

*Ключові слова: гідрорізання, гідроабразивне різання.*

Y. V. KLAPTSOV, I. V. PANASYUK, I. V. PETKO

Kyiv National University of Technologies and Design, Kyiv, Ukraine

### DETERMINATION OF CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF JET FORMING EQUIPMENT

*Traditional methods of cutting new materials with special physical and mechanical properties may be ineffective. Recently new methods are more often used for this purpose, especially cutting materials by high-speed hydro jet, which contains abrasive.*

*The aim of our investigation was to develop mathematical model of forming of the high-speed cutting two-phase hydro jet in order to determine rational parameters of jet forming device.*

*We worked out the mathematical model of forming of the high-speed hydro abrasive jet with local twisting of solid phase at the entrance to accelerating channel. The model allows to determine correlation between power parameters of the hydro abrasive jet and constructive parameters of jet forming device. It has been proved, that kinetic energy of abrasive particles depends not only on working liquid pressure and jet forming nozzle diameter but also on the angle of abrasive supply to accelerating channel, diameter and length of this channel. Analytic investigations revealed that kinetic energy of solid phase of the high-speed hydro abrasive jet will reach maximum if the angle of abrasive supply to accelerating channel is 35–50° and the length of accelerating channel is 40–60 mm.*

*Keywords: cutting, hydro abrasive jet, jet forming device.*

### Вступ

У різних галузях промисловості процес різання, як правило, відбувається в результаті механічної дії різального інструмента на матеріал. Проте в ряді випадків, особливо під час обробки поверхонь складної форми та у важкодоступних місцях, цей метод малоефективний або взагалі неприйнятний. Окрім того, традиційні методи для розкрою нових матеріалів зі спеціальними фізико-механічними властивостями малоефективні, тому що знижується продуктивність, підвищується собівартість, а в деяких випадках не забезпечується якість різання. Останнім часом для різання матеріалів все частіше застосовують високоєфективні методи, одним з яких є розрізання матеріалів високошвидкісним струменем рідини та струменем абразиву, що містить абразив.

Таким чином, дослідження в області розробки струменеформуючих пристроїв для розрізання традиційних матеріалів, а особливо нових матеріалів з спеціальними фізико-механічними властивостями, є актуальною науково-технічною задачею.

### Аналіз останніх досліджень

За останні роки в технічній літературі з'явилися наукові роботи, в яких наведені результати досліджень робочих органів гідрорізального устаткування. Але ряд питань залишається ще не вирішеним. Відомі конструкції робочих органів, що формують високошвидкісний ріжучий струмінь, не забезпечують ефективності використання енергії потоку при зміні режимів розкрою матеріалів. Відсутні також дослідження стосовно вибору раціональних параметрів конструкції робочого органу, що формує ріжучий двофазний струмінь. Стримуючим фактором є також відсутність науково обґрунтованих рекомендацій по вибору конструктивних та технологічних параметрів гідро- та гідроабразивного устаткування для розкрою матеріалів.

### Постановка завдання

Мета досліджень – створення математичної моделі формування високошвидкісного ріжучого двофазного струменя рідини для визначення раціональних конструктивних параметрів струменеформуючого пристрою.

### Викладення основного матеріалу

При формуванні різального гідроабразивного струменя відбувається складна взаємодія двох середовищ, в результаті якої енергія струменя йде на розгін абразиву. Струменеформуючий пристрій працює таким чином (рис. 1). Рідина високого тиску 1 подається до сопла 2 і витікає з надзвуковою швидкістю. Проходячи через змішувальну камеру 3, струмінь рідини захоплює частинки абразиву 4 і разом з ними поступає в канал прискорюючого насадка 6, де відбувається розгін абразивних частинок і формування гідроабразивного струменя.

Як було визначено в роботах [1, 2], окрім таких факторів як тиск рідини, діаметр сопла, довжина прискорюючого насадка, витрата абразиву на енергетичні параметри високошвидкісного двофазного струменя впливають також умови взаємодії абразивних частинок з гідроструменем на початковому етапі, а саме кут підведення твердої фази до входу в канал прискорюючого насадка і інтенсивність закручування

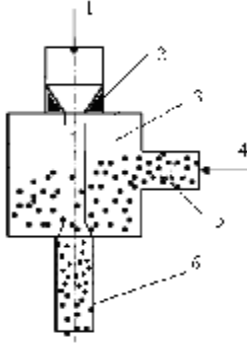


Рис. 1. Схема утворення гідроабразивного струменя

абразивних частинок в обертально-поступальному русі. Тому при аналітичному дослідженні формування високошвидкісного двофазного потоку оцінювався вплив твердих частинок на структуру потоку в пристінній області, а саме його закручування.

Складна структура двофазного потоку і відсутність надійного експериментального матеріалу ускладнює його математичний опис. У зв'язку з цим до теперішнього часу ще не створені фізично обґрунтовані інженерні методи розрахунку двофазних потоків. У роботі [3] показано, що найбільш точними і ефективними методами дослідження, які дозволяють до того ж уточнити фізичний стан потоку, є методи математичного моделювання.

Рівняння руху і нерозривності у разі двофазної симетрично-осьової турбулентної течії в наближенні граничного шару можна записати роздільно для несучої рідини і абразивних частинок [4, 5]. Початкова

система рівнянь має вигляд:  
для несучої рідини:

$$r w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + r w_r \frac{\partial w_x}{\partial r_o} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r_o} \frac{\partial (t r_o)}{\partial r_o} + F b r_s (w_{sx} - w_x), \quad (1)$$

де  $x, \varphi, r$  – циліндрова система координат, вісь в якій співпадає з віссю каналу;  $w$  – швидкість;  $p$  – статичний тиск;  $r_o$  – радіус каналу;  $\rho$  – густина несучого середовища;  $\rho_s$  – густина абразивного матеріалу;  $\tau$  – дотичні напруження;  $\beta$  – концентрація абразивного матеріалу в потоці;  $F$  – комплекс  $\frac{18\mu}{d_s^2 r_s}$ ;  $\mu$  – динамічна

в'язкість;  $d_s$  – діаметр абразивної частинки; індекси:  $x, \varphi, r$  – напрямком по відповідній осі циліндричної системи координат;  $s$  – параметри абразивного матеріалу;

$$r w_x \frac{\partial w_j}{\partial x} + r w_r \frac{\partial w_j}{\partial r_o} + r \frac{w_j w_r}{r_o} = \frac{1}{r_o^2} \frac{\partial (t_j r_o^2)}{\partial r_o}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r_o} = r \frac{w_x^2}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial (w_x r_o)}{\partial x} + \frac{\partial (w_r r_o)}{\partial r_o} = 0; \quad (4)$$

для абразивної фази:

$$r_s w_{sx} \frac{\partial w_{sx}}{\partial x} + r w_{sr} \frac{\partial w_{sx}}{\partial r_o} = r_s F b (w_x - w_{sx}), \quad (5)$$

$$\frac{\partial (w_{sx} r_o)}{\partial x} + \frac{\partial (w_{sr} r_o)}{\partial r_o} = 0. \quad (6)$$

На присутність абразивної фази вказує останній член рівняння (1), який враховує силу опору частинок при обтіканні їх потоком рідини.

Використовуючи відомі основні залежності для розрахунку двофазного граничного шару, та отримані залежності розрахунку параметрів тертя зони пристінної течії, одержали систему рівнянь, яка повністю описує двофазний потік «рідина – абразивні частинки» з локальним закручуванням абразиву на вході в канал прискорюючого насаддя. Для чисельної реалізації отриманої системи рівнянь був розроблений метод розрахунку, який складається з наступних основних частин:

1. Розрахунок характеристик течії в аксіальному напрямі: відносної товщини підшару  $X_{1x}$ , відносної швидкості на межі ламінарного підшару  $w_1$ , та інтегральних комплексів – відносної товщини втрати імпульсу  $(\frac{d^{++}}{d})_x$ , відносної товщини витіснення  $(\frac{d^+}{d})_x$ , коефіцієнту тертя в осьовому напрямку  $\frac{c_{fx}}{2}$ .
2. Розрахунок параметрів тангенціального руху: відносної товщини підшару в тангенціальному напрямку  $X_{1j}$ , відносної циркуляції, інтегральних комплексів  $(\frac{d^{++}}{d})_j$ ,  $(\frac{d^+}{d})_j$  коефіцієнту тертя  $\frac{c_{fj}}{2}$ .
3. Визначення профілю концентрації  $b$ .
4. Рішення диференціальних рівнянь руху несучого середовища і потоку частинок. При цьому рівняння руху в проекції на вісь  $x$  прийняло вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d Re_x^{++}}{dX} = & \left\{ \frac{c_{fx}}{2} R_1 W_0 + \frac{4 Re_x^{++}}{R_1} \left[ \frac{R_1}{2} \frac{d_x}{r_0} \frac{1}{W_0} \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{d_x}{r_0} \right) - \frac{Re_x^{++}}{W_0} (1+H) \right] \frac{dH}{dX} + \right. \\ & \left. + \frac{d_x}{r_0} \frac{R_1}{2 W_0 w_1^2 r_0} \int_0^1 \frac{dP}{dX} \left( 1 - \frac{d_x}{r_0} x_x \right) dx_x + \frac{18 m r_s}{r_s d_s^2} \frac{R_1}{r} \frac{d_x}{w_1 W_0} \frac{1}{r_0} \int_0^1 b(w_{sx} - w_x) \left( 1 - \frac{d_x}{r_0} x_x \right) dx_x \right\} + \\ & \div \left\{ 1 + \frac{4H}{R_1} \left[ \frac{Re_x^{++}}{W_0} (1+H) - \frac{R_1}{2} \frac{d_x}{r_0} \frac{1}{W_0} \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{d_x}{r_0} \right) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $Re^{++}$  – критерій Рейнольдса, визначений по товщині втрати імпульсу;  $X$  – відносна відстань від входу до розглядаємого перетину  $X = \frac{x}{2r_0}$ ;  $R_1$  – число Рейнольдса, визначене за середньовитратною

швидкістю;  $W_0$  – безрозмірна швидкість  $W_0 = \frac{w_{x0}}{w_1}$ ;  $H$  – безрозмірна товщина граничного шару  $H = \frac{d_x^+}{d_x^{++}}$ ;  $\delta_x$

– товщина динамічного граничного шару; індекси: 0 – зовнішня межа граничного шару; 1 – умови на вході;  $u$  – параметри на стінці.

А рівняння руху в тангенціальному напрямі:

$$\frac{d Re_j^{++}}{dX} = \frac{c_{fj}}{2} R_1 \frac{w_{j0}^2}{W_0 w_1^2} - \frac{Re_{ju}^{++}}{W_0} \frac{4}{R_1} \left( H \frac{d Re_x^{++}}{dX} + Re_x^{++} \frac{dH}{dX} \right) - \frac{d(Re_{ju}^{++} - Re_j^{++})}{dX} \quad (8)$$

Запропонований метод розрахунку описує двофазну течію з локальним закручуванням твердої фази. Розв'язання рівнянь (7) і (8) здійснювали методом Рунге-Кутта. В результаті розрахунків отримані основні характеристики структури двофазного потоку, які дозволили визначити розподіл концентрації абразиву в перетинах каналу в залежності від довжини каналу. Результати проведеного розрахунку двофазного потоку з локальною закруткою твердої фази представлені на рис 2.

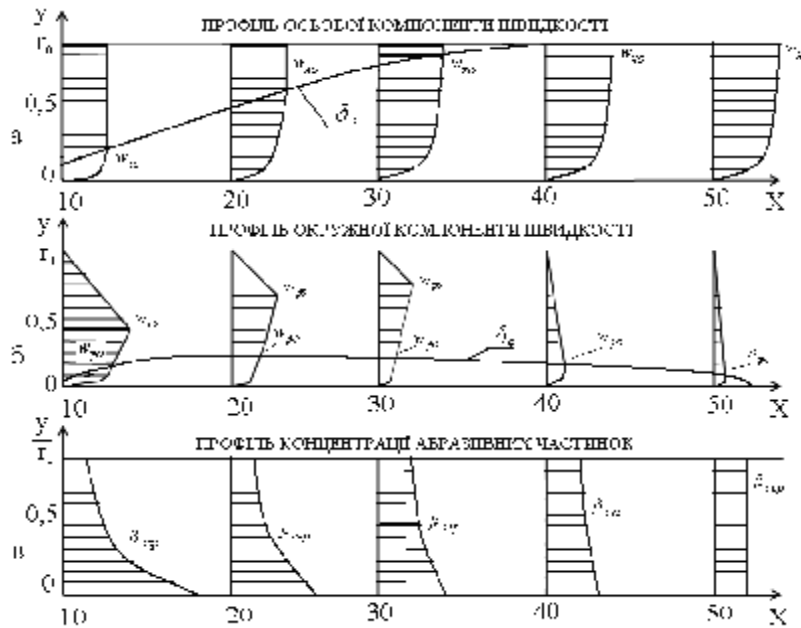


Рис. 2. Розподіл швидкостей двофазного потоку та концентрації абразиву в перетинах по довжині каналу: а – профіль осьовий компоненти швидкості, б – профіль окружної компоненти швидкості, в – профіль концентрації

Профіль осьової швидкості складається з граничного шару, і "зовнішньої" області. Розподілення швидкості в перетинах змінюється поки не настає змикання поздовжнього граничного шару (рис. 2,а). У потоці з локальною закруткою твердої фази спостерігається істотна нерівномірність поля концентрації  $b$ .

Профіль концентрації на вході в канал прискорюючого насадка характеризується зростанням  $b$  у бік стінки каналу, що викликано дією відцентрового ефекту (рис. 2, в). В процесі виродження обертального руху за рахунок турбулентної дифузії відбувається вирівнювання профілю концентрації (рис. 2, б), а на кінці розрахункової ділянки розподіл концентрації наближається до рівномірного (рис. 3).

Збільшення інтенсивності крутки створює більш градієнтний розподіл домішок в каналі (рис. 4.) В зв'язку з тим, що є відповідність між інтенсивністю крутки і кутом конусності стінок змішувальної камери залежність концентрації наведено відносно кута конусності  $\alpha_k$ .

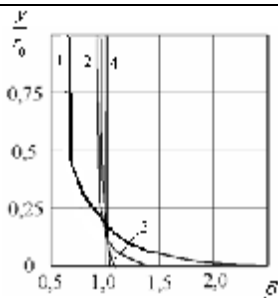


Рис. 3. Залежність концентрації абразивних частинок в перетинах каналу прискорюючого насадка при  $\alpha_k = 60^\circ$ : 1 –  $X=5$ ; 2 –  $X=15$ ; 3 –  $X=30$ ; 4 –  $X=50$

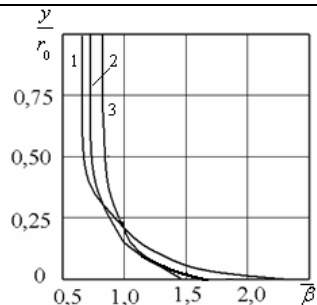


Рис. 4. Залежність концентрації абразивних частинок в перетині  $X=5$  від кута конусності змішувальної камери: 1 –  $\alpha_k = 60^\circ$ ; 2 –  $\alpha_k = 45^\circ$ ; 3 –  $\alpha_k = 30^\circ$

### Висновки

Розроблена математична модель формування високошвидкісного гідроабразивного струменя з локальним закручуванням твердої фази на вході в прискорюючий канал дозволяє встановити взаємозв'язок між енергетичними параметрами гідроабразивного струменя і конструктивними параметрами струменеформуючого пристрою. Доведено, що на кінетичну енергію частинок абразиву окрім тиску робочої рідини, діаметру струменеформуючого сопла впливає кут підведення абразивних частинок до прискорюючого каналу, діаметр і довжина прискорюючого каналу. На основі аналітичних досліджень встановлено, що кінетична енергія твердої фази високошвидкісного струменя рідини, яка містить абразив, досягає максимальних значень при куті підведення абразиву до прискорюючого каналу  $35\text{--}50^\circ$  і довжині прискорюючого каналу  $40\text{--}60$  мм.

### Література

1. Клапцов Ю.В. К питанню про взаємодію гідроабразивного струменя з матеріалом, що розрізається / Ю.В. Клапцов, І.В. Панасюк, І.В. Петко // Вісник КНУТД. – 2006. – № 6. – С. 5–57.
2. Клапцов Ю.В. Дослідження впливу конструктивних параметрів устаткування на продуктивність гідроабразивного розрізання / Ю.В. Клапцов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 1. – С. 25–28.
3. Клапцов Ю.В. Аналіз методів аналітичного дослідження формування високошвидкісних гідро- та гідроабразивних струменів / Ю.В. Клапцов, І.В. Панасюк, І.В. Петко // Вісник КНУТД. – 2010. – № 5 (55). – С. 285–290.
4. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами / Бусройд Р. – М. : Мир, 1975. – 423 с.
5. Соу С.Л. Гидродинамика многофазных систем / Соу С.Л. – М. : Мир, 1971. – 537 с.

### References

1. Klaptsov Yu.V., Panasyuk I.V., Petko I.V. K pytannu pro vzaemodiyu gidroabrazivnogo strumenya z materialom, sho rozrizaatsya. // Visnyk KNUVD. 2006. № 6. S. 51–57
2. Klaptsov Yu.V., Petko I.V., Panasyuk I.V. Doslidzhennya vplyvu konstruktyvnyh parametriv ustatkuvannya na produktivnist' gidroabrazivnogo rozrizannya. Herald of Khmelnytsky national university. 2007. № 1. S. 25–28.
3. Klaptsov Yu.V., Petko I.V., Panasyuk I.V. Analiz metodiv analitichnogo doslidzhennya formuvannya visokoshvidkisnih gidro- ta gidroabrazivnih strumeniv. Visnyk KNUVD. 2010. № 5 (55). S. 285–290.
4. Busroid R. Techenie gaza so vzveshennymi chasticami. M., Mir, 1975. – 423 s.
5. Sou S.L. Gidrodinamika mnogofaznyh sistem. M., Mir, 1971. – 537 s.

Рецензія/Peer review : 18.3.2013 р.

Надрукована/Printed :21.4.2013 р.

Рецензент: д.т.н., проф., завідувач кафедри електромеханічних систем Київського національного університету технологій та дизайну Злотенко Б.М.