

УДК 621.9.044

Дудюк В. О.

### МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ШВИДКОПЛИННОГО ГІДРОАБРАЗИВНОГО ПОТОКУ З ПЕРЕПОНОЮ

Формування двофазного швидкоплинного потоку малого діаметра, його взаємодія із перепорою (оброблюваним тілом) є складним багатоплановим процесом. Явища, що супроводжують натікання струменя на перепору і виконання роботи мікрорізання абразивними частинками, впливають також і на елементи струминної системи: відбиті від поверхні обробки частинки бомбардують торець калібрувальної трубки, а хвильові процеси, які збуджуються у самому струмені, за поширюються уздовж струменя до крайки сопла, розривають оболонку струменя та створюють нерівномірне динамічне навантаження на зріз калібрувальної трубки [1]. Впливають на нерівномірність динамічного навантаження елементів струминної системи і умови стікання струменя. Так як на основі результатів досліджень [2] зміна напрямку течії потоку призводить до перерозподілу імпульсів руху, і, відповідно, роботи мікрорізання (яка для калібрувальної трубки є роботою зношування), виникає необхідність прогнозування форми отвору каналу при роботі у певних умовах.

Метою роботи є встановлення залежності нерівномірного зносу крайки калібрувального каналу від умов натікання та форми поверхні натікання.

Для опису форми скористаємося підходом, висвітленим В. Б. Струтинським у [3], який запропонував форму контуру визначати за допомогою ряду Фур'є. Так, відхилення від очікуваного контуру, що виникають внаслідок ексцентриситету, у функції кута визначаються як  $\delta(\varphi) = \sqrt{R_0^2 + e^2 + 2eR_0 \sin \varphi_1} - R_0$  або як перша гармоніка ряду  $\delta_1(\varphi) = A_1 \sin(\varphi + \psi_{01})$ ,

відхилення у вигляді еліпсу –  $\delta_2(\varphi) = \rho - R_0 = \frac{b}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \cos^2 \psi}} - R_0$ , або як друга гармоніка

$\delta_2(\varphi) = A_2 \sin 2\varphi$ ; відповідно для огранки з трьома променями одержано  $\delta_3(\varphi) = A_3 \sin(3\varphi)$ , тобто в загальному вигляді відхилення контуру від базового кола відповідатиме рівнянню:

$$R(\varphi) = R(\varphi) - R_0 = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(k\varphi + \psi_{0k}) \quad (1)$$

Роботу мікрорізання здійснює кожна частинка, яка потрапляє в змішувальну камеру і набуває імпульсу руху від потоку рідини. Рухаючись дотично до поверхні трубки, частинка виконує штрих по поверхні, гальмуючись і втрачаючи власну кінетичну енергію, яка у компенсується наступними масами рідини, що рухаються у каналі. При цьому обсяг вилучення матеріалу залежатиме від кількості актів взаємодії. За час контакту частинка виконує одиничну роботу руйнування, а загальна кількість частинок, розташованих на периферії струменя і приймаючих участь у роботі руйнування, [4] становитиме:

$$n = \frac{0,5\pi(r_{cp}^2 - r_c^2) + r_{cp}^2 [2 \arccos(1 - D_k / r_{cp}) - \sin(2 \arccos(1 - D_k / r_{cp}))]}{\pi r_{cp}} n_0 = kn_0, \quad (2)$$

де  $d_3$  – діаметр абразивного зерна;  $n_0$  – зальна кількість часток, що прямують через сопло у визначений проміжок часу. Тоді за час  $T$  обсяг вилученого з поверхні трубки матеріалу буде дорівнювати:

$$W_z = \left( \frac{\pi \delta_n^2 n (3r - \delta_n)}{3} + \frac{\delta_n (6a + 8b)}{15} \delta_a \right) \frac{M_a}{m} T_k . \quad (3)$$

Оскільки нормальна і тангенціальна складові швидкості руху абразивних частинок безпосередньо обумовлюють обсяг руйнування, виникає необхідність визначення векторів швидкості руху частинок. Так як нині систематизованих відомостей стосовно розподілу тисків та імпульсів руху абразивних частинок по внутрішній поверхні калібрувальної трубки нами не виявлено, прийнято рішення про використання орієнтованих пакетів прикладних програм. Таким пакетом обрано FlowVision.

Ядром пакету є блок чисельного розв'язання рівняння руху рідини у ортогональній системі координат (рівняння Нав'є-Стокса), яке для певних початкових і граничних умов, заданих користувачем, дозволяє отримати епюри розподілу швидкостей і динамічних тисків у точці контакту струменя з тією чи іншою поверхнею.

Початкові умови визначаються геометричним профілем соплового насадку, тиском рідини  $p_b$ , її властивостями. Граничні умови обумовлюють натікання струменя на поверхню, якою є внутрішня циліндрична поверхня калібрувальної трубки, вісь якої повернута відносно осі сопла на певний кут  $\varepsilon$ . Масоперенос визначали, виходячи з рівняння Стокса, що визначає силу опору частинки у потоці

$$F_c = \frac{18\mu\Delta w}{d_s^2},$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати рідини через сопло;  $d_s$  – діаметр сопла.

Оскільки при введенні частинок абразиву у потік рідини – швидкоплинний струмінь – можливе закручення, швидкість задавали з урахуванням цієї особливості:

$$w_{sr} = \frac{w_\varphi^2 d_s^2 \rho_s}{18\mu r}, \quad (4)$$

де  $w_{sr}$  – швидкістю руху від центру до периферії.

Внаслідок інтенсивного переміщення частинок в поперечному напрямі в закрученому потоці, спостерігається істотна нерівномірність поля концентрації. При математичному описанні досліджуваного явища передбачається, що найбільшу нерівномірність має профіль концентрації на вході в прискорюючий канал, де завихреність потоку має максимальне значення. З падінням крутки профіль концентрації вирівнюється, а у відсутності обертального руху приймається рівномірний розподіл дискретної речовини по перетину.

Профіль концентрації частинок  $f_i$ , що входить в динамічні рівняння, встановлювали використовуючи рівняння турбулентної дифузії у вигляді:

$$w_{sr} \frac{\partial \beta}{\partial y} = D_m \frac{\partial^2 \beta}{\partial y^2}.$$

Коефіцієнт дифузійного перенесення  $D_m$  визначається згідно роботи [4]. Рішенням рівняння (3) є вираз:

$$\beta = \int_0^r \left( C_1 e^{\int_0^r \frac{w_{sr}}{D_m}} \right) dr + C_2 . \quad (5)$$

Для розрахунків створено відповідну модель, рис. 1, а.

Змінними параметрами при моделюванні обрано кут падіння струменя та форма поверхні на яку падає струмінь, вихідними прийнято тиск  $P_0$ , та швидкість швидкоплинного струменя  $v_c$ .

Межі змін вхідних параметрів встановили, виходячи з результатів електронно-мікроскопічного дослідження зон різання див рис. 1, б.

Розглянемо натікання швидкоплинного струменя на перепону. Для цього було створено тривимірну модель зони на тікання швидкоплинного потоку в програмному пакеті Solid Works, всі геометричні розміри та технологічні параметри струменеформуєчої системи відповідають дійсним та зведені до табл. 1.

Зону натікання струменя моделювали у вигляді прямокутної призми. Для спрощення розрахункової моделі, так як модель симетрична, будували її половину симетрично розітнувши вздовж вісі струменя, площина 2. Для завдання крайки струменеформуєчого каналу в моделі побудовано циліндричну поверхню, яка складається із поверхонь 3, 4. Нижня основа 5 призми виступає в ролі перепони на яку натікає швидкоплинний струмінь. Так як розглядається обмежений об'єм простору, поверхні 1 (три бічні стінки та верхня основа призми) є площинами «вільного виходу» рідини.

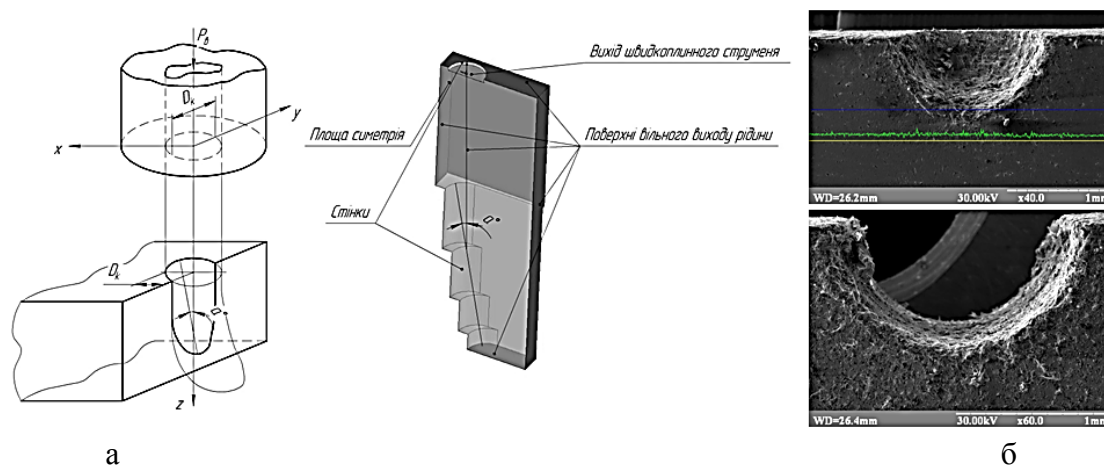


Рис. 1. Розрахункова схема (а) та електронні мікрофотографії зони різання (б) (параметри  $d_c = 1,1$  мм;  $P_g = 300$  МПа;  $h_c = 4$  мм)

Таблиця 1

Геометричні та технологічні параметри розрахункових моделей

№ п/п	Тиск на зрізі сопла, $P_g, \text{МПа}$	Діаметер сопла, $d_c$ мм	Кут натікання струменя	Примітки
1	300	1,1	90	Гладка поверхня, циліндроїд
2			20	Гладка поверхня, циліндроїд
3			75	Гладка поверхня, циліндроїд
4			79	Ступічаста форма поверхні

Приклад моделювання зі ступінчатою формою поверхні падіння подано на рис. 2.

Використання пакету дозволило визначити зміну осьового динамічного тиску  $p_i$  у функції часу  $t$ . Так, встановлено, що залежно від напрямку та швидкості  $s_p$  відносного руху подачі, механізму руйнування матеріалу та утворюваних при цьому сходинок різання, на крайці калібрувальної трубки можливі випадки виникнення ударних гідродинамічних явищ, обумовлених хвиловими процесами у самому струмені в момент натікання його на перепону, що, в цілому, узгоджується з висновками роботи. Ці явища викликають короткочасне (тривалістю не більше  $T_n = 0,1$  с) навантаження окремих ділянок крайки з середнім рівнем тиску  $p_n = 40\text{--}50$  МПа (рис. 3), причому ділянки такого навантаження розташовані на протилежній від фронту гідрорізання частині крайки, їх площа становить  $0,005\text{--}0,01 F_{Dk}$ .

З поданого графіку видно, що зміна динамічного тиску більша на частині крайки, протилежній напрямку руху струменя, отже, виходячи з того, що кут нахилу фронту гідро різання не перевищує  $\pi/12 - \pi/18$ , цей тиск може сягати 40–50 МПа. В зонах локальної зміни тиску виникатиме зміна напрямку руху абразивних частинок. Тоді, прийнявши припущення, що у зонах рівномірного тиску вектор швидкості руху частинок співпадає з віссю струменя, а у зонах змін тиску частинки змінюють напрям і набігають на внутрішню поверхню під певними кутами, з рівняння (3) неважко визначити обсяг вилученого матеріалу.

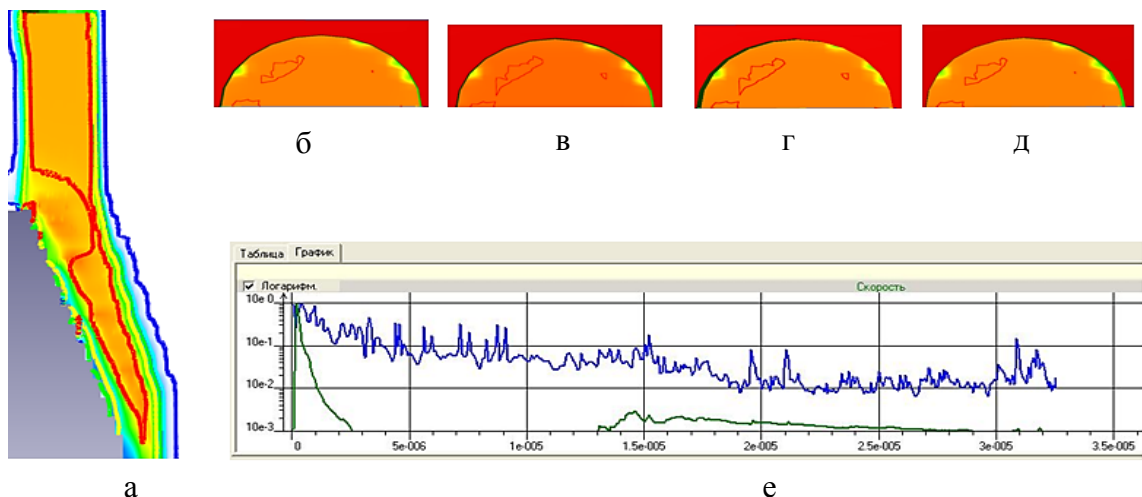


Рис. 2. Розрахункова модель різання товстого матеріалу зі ступінчатою структурою борозенки різа з кроком  $h=0,1$  мм та кутом стікання  $\pi/12$  рад:

а – розподіл повного динамічного тиску рідини  $p_d$  за перетином каналу; б – на його зрізі в фіксований момент часу  $t = 5$  мс; в – фіксований момент часу  $t = 10$  мс; г – фіксований момент часу  $t = 100$  мс; д – фіксований момент часу  $t = 500$  мс; е – графік зміни швидкості та тиску в струмені з плином часу

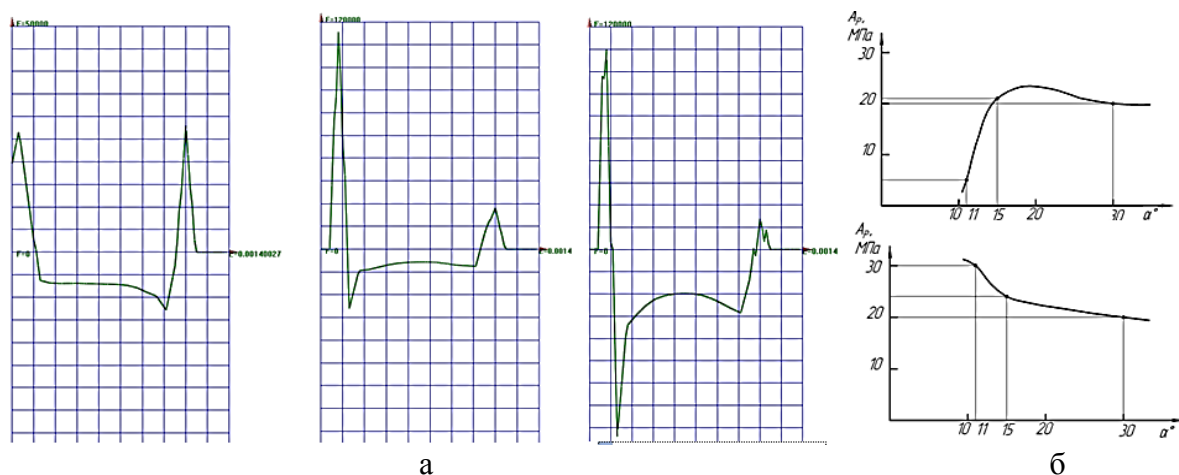


Рис. 3. Епюри розподілу динамічного тиску на крайці калібрувальної трубки за усім перетином (а) та залежність тиску від кута нахилу фронту борозенки різа (б) у критичних точках калібрувальної трубки (зліва – частина від борозенки різа, справа – протилежна частина)

Насправді, поява зон локальної зміни тиску веде до виникнення на рухомих частинках абразиву додаткового навантаження, направлено до стінки калібрувальної трубки. Оскільки

на частину діє сила  $P = \Delta p_d \frac{\pi D_a^2}{4}$ , частинка починає рухатися рівноприскорено до стінки,

набуваючи на шляху  $r_a$  швидкості  $v_r$ , що дорівнює  $v_r = D \sqrt{\frac{\pi \Delta p}{2m}} r_a$ . Визначивши у такий спосіб тангенціальну (направлену до стінки) та нормальну (за балансом енергії потоку) швидкість руху частинок, побудували діаграму зношування крайки калібрувальної трубки, подану на рис. 4.

Аналіз діаграми дозволяє зробити такі висновки: відхилення від круглості отриманого перетину крайки калібрувальної трубки задовільно описується рядом Фур'є з трьома значущими гармоніками; зміна умов натікання струменя на перепону змінює орієнтацію променів відхилень, які функціонально пов'язані із орієнтацію відхилення струменя площиною струминної ерозії; більші відхилення, обумовлені більшим перепадом тиску, властиві умовам натікання струменя на перепону під більшими кутами.

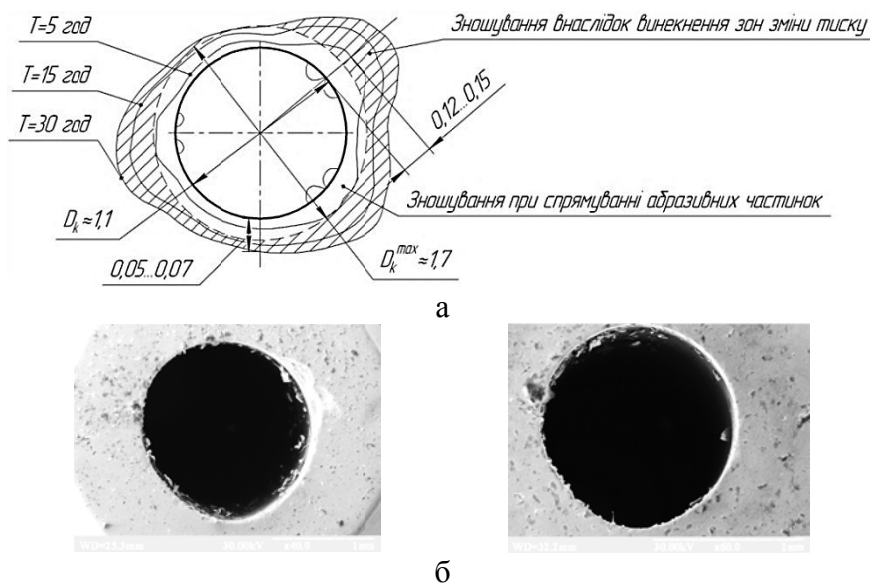


Рис. 4. Відхилення від округлості крайки калібрувальної трубки:  
а – моделювання зношування крайки трубки; б – електронні мікрофотографії торця калібрувальної трубки

## ВИСНОВКИ

Таким чином, локальна зміна тиску в поперечному перетині на зрізі калібрувальної трубки веде до зміни швидкості руху по каналу абразивних часток і, в свою чергу, до відповідного, нерівномірного зношування каналу та його крайки. Для зменшення нерівномірності зношування і стабілізації процесу гідроабразивного різання необхідно створити умови для постійної зміни положення трубки шляхом її обертання довкола вертикальної осі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дудюк В. О. Аналіз динамічного навантаження елементів зони гідрорізання із використанням прикладного пакету Flow Vision / В. О. Дудюк // Вісник КДУ ім. М.Остроградського. – Кременчук : КДУ, 2010. – вип. 6/2010(65), ч.1 – С. 59–62.
2. Саленко О. Ф. Поліпшення стабільності процесу гідроабразивного різання конструктивними засобами / О. Ф. Саленко, В. О. Дудюк // Вісник СевНТУ. Вип. 107 : Машиноприладобудування та транспорт : зб. наук. пр. – Севастополь : Вид-во СевНТУ, 2010. – С. 197–202.
3. Струтинський В. Б. Технологія моделювання динамічних процесів та систем : монографія / В. Б. Струтинський, Н. Р. Веселова – Вінниця : О. Власюк, 2007. – 466 с.
4. Стефанович Т. О. Вплив геометрії сопла на параметри процесу струменевої обробки поверхонь виробів / Т. О. Стефанович, З. А. Стоцько // Всеукраїнський науково-технічний журнал : Промислова гідраліка і пневматика. – Вінниця, 2006. – № 4 (14). – С. 48–51.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2015 р.