

УДК 51:62.768:620.169.1

## ПІДВИЩЕННЯ ОПОРУ РУЙНУВАННЮ КАЛІБРУВАЛЬНОЇ ТРУБКИ ГІДРОАБРАЗИВНИХ ПРИСТРОЇВ

*О. Ф. САЛЕНКО, М. С. ХОРОЛЬСЬКА*

*Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського*

За результатами моделювання двофазного потоку та його руху в калібрувальній трубці встановлено різні інтенсивність і характер зношування її протокової частини, що обумовлює тут певні функціональні зони. Забезпечити стабільність отвору протокової частини можна, використовуючи відповідні захисні шари, які під час експлуатації трубки зменшують швидкість ерозії у функціональних зонах залежно від умов дії абразивних частинок.

**Ключові слова:** *гідроабразивне різання, калібрувальна трубка, зношування, захисні шари.*

Забезпеченню якості гідроабразивного різання відповідальних виробів приділяли чимало уваги [1–3]. Встановили, що внаслідок пошкодження та руйнування протокового каналу калібрувальної трубки, що формує багатофазний швидкоплинний потік і забезпечує його різальні та енергетичні властивості, виникають переважно параметрична (а в деяких випадках і функціональна) відмова процесу та брак. Зі зростанням діаметра каналу неодмінно знижується питома енергетична ефективність струменя, через що збільшується ширина прорізання і погіршується якість самої крайки.

Калібрувальна трубка – це високоточний циліндричний виріб завдовжки 90...120 mm із профільним каналом, діаметр якого 0,9...1,25 mm на зрізі та 4,2...4,5 mm на вході. Вхідна частина каналу – конус завдовжки 15...18 mm, який далі має практично циліндричну форму. Трубка виготовлена із вольфрамівмісного твердого сплаву типу ВК, який досить тривкий до абразивно-кавітаційних пошкоджень від дії швидкоплинного потоку рідини. Встановлено [4], що під час використання гранатового піску фракційністю 300 mesh за витрат 0,2...0,8 kg/min та роботі під тиском технологічної рідини 250...300 МПа тривкість трубки до граничного зносу 18...22 h. Такий знос зумовлює збільшення отвору каналу майже удвічі (до 2,0...2,5 mm), що не гарантує точності виконання лінійних розмірів 160...500 mm під час обробки навіть за дев'ятим квалітетом. Зважаючи на плинний розвиток пошкоджень, стає очевидним, що якісна та точна (в межах восьмого квалітету) обробка можлива лише впродовж перших 2...4 h експлуатації, а забезпечити розміри за дев'ятим квалітетом вдається за обмеження часу експлуатації до 9...10 h.

Аналіз картин пошкодження та руйнування каналу виявив, що роботоздатність втрачається через утворення початкових поверхневих дефектів; подальше їх зростання до моменту, коли вони вже суттєво впливають на умови руху каналом багатофазного потоку; формування великих дефектів, які зумовлюють вихрові явища та погіршують енергетичні параметри струменя з настанням неодмінної параметричної відмови. Також встановлено, що внаслідок зародження та розвитку початкових дефектів практично симетрично збільшується діаметр каналу, а зони підвищеної ерозії спричиняють функціональну відмову і появу т.зв. “свищів”.

---

*Контактна особа:* М. С. ХОРОЛЬСЬКА, e-mail: mariannamax@ya.ru

Універсальний спосіб забезпечити параметричну надійність струменеформувальних засобів – лімітувати час їх роботи. Однак, враховуючи відносно високу вартість трубок (~100\$), необхідно підвищувати їхній ресурс, беручи до уваги суттєве (понад 35%) розсіювання швидкості пошкодження [5, 6].

Таким чином, важливо усунути ерозію або стабілізувати її для продовження періоду тривкості калібрувальних трубок. Для цього необхідно проаналізувати закономірності формування багатофазного потоку рідини під час його прямування крізь отвір трубки, а також виявити функціональні зони і знайти відповідні засоби, здатні підвищити опір руйнуванню цих зон упродовж періоду тривкості.

**Моделювання двофазного струменя.** Особливості утворення багатофазних потоків досліджували в багатьох працях [7–20]. Однак сучасні теоретичні моделі спираються на те, що струмінь формується лише в каналі калібрувальної трубки. Розгін суміші повітря і абразивних частинок струменем надвисокого тиску описують як течію двох паралельних осесиметричних потоків, взаємодія яких обумовлена силами тертя, що виникають при цьому. Тут враховують тільки діаметр сопла і тиск рідини (води), а усереднену швидкість потоку на зрізі трубки визначають за енергетичним балансом. До того ж не беруть до уваги вплив параметрів камери змішування, а також зміну динамічних і структурних характеристик водяних струменів високого тиску під час їх руху в протоковій частині струменеформувальних елементів. Для різання важливо знайти саме усереднену швидкість потоку на зрізі трубки та його щільність, а отже, встановити запас кінетичної енергії, який можна перетворити в роботу мікрорізання.

Аналізуючи соплові пристрої, зокрема калібрувальні трубки, що вийшли з ладу під час експлуатації, виявили детерміновані зони руйнування, спричинені рідинно-абразивним струменем, який викликає ерозійне і кавітаційне зношування внутрішніх каналів аж до повного їх руйнування (рис. 1). Встановлено [21], що профіль каналу у цих зонах має чітко виражений хвилеподібний характер, обумовлений вихровими явищами і потраплянням, захопленням та розгоном частинок у змішувальній камері.

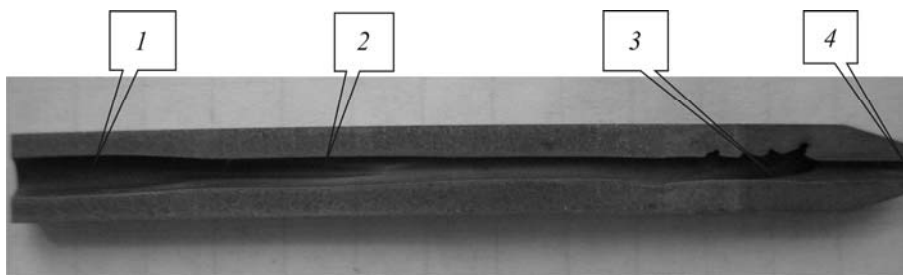


Рис. 1. Зони руйнування (зношування) каналу калібрувальної трубки, спричинені:  
 1 – дією струменя за найбільших кутів атаки; 2 – хвильовими процесами у тілі струменя;  
 3 – дефектами матеріалу трубки або перекосом сопла відносно трубки;  
 4 – відбивальною дією на торець трубки частинок від оброблюваної поверхні.

Fig. 1. Areas of calibration tube channel fracture (wear) caused by:  
 1 – the influence of largest angles of attack; 2 – wave processes in jet body;  
 3 – defects in the tube material or the distortion of nozzle relative to tube;  
 4 – the reflective effect on tube end of particles from the treated surface.

Відсутність відповідного математичного опису закономірностей розвитку зонального руйнування та складнощі виконання натурних експериментів спонукають до залучення математичного моделювання руху багатофазного потоку в калібрувальній трубці.

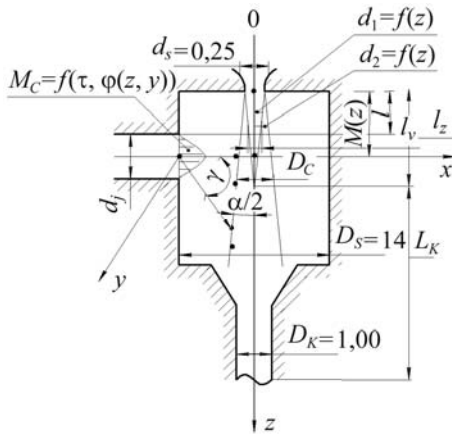


Рис. 2. Схема ежекції частинок до струменя.

Fig. 2. Scheme of particles ejection to jets.

прямування відносно поверхні каналу.

Витрату абразивних частинок, що вводять до струминного потоку внаслідок ежектування повітря в камері змішування, визначають умови витікання струменя та геометричні параметри сопла, камери, трубки підведення абразиву (жиклера) (рис. 2). За рівнянням Менделєєва–Клапейрона розраховували витрату абразивних частинок як функцію геометричних параметрів струменеформувальної системи:

$$Q_m = \frac{5}{2} \mu \pi d_c^2 \sqrt{\frac{2 p_b d_j^2 l_j \rho_r}{[x_a \rho_r + \rho_a (100 - x_a)] d_k^2 l_k}}, \text{ kg/min}, \quad (1)$$

де  $d_c$ ,  $d_j$ ,  $d_k$  – діаметри сопла, отвору жиклера та змішувальної камери, м;  $\mu$  – коефіцієнт витрати сопла;  $\rho_a$ ,  $\rho_r$  – густини абразивних частинок та рідини,  $\text{kg/m}^3$ ;  $l_j$ ,  $l_k$  – довжини жиклера та змішувальної камери, м;  $x_a$  – масова концентрація абразиву у рідині, %;  $p_b$  – тиск витікання струменя, Па. При цьому врахували, що частинки вводять до потоку на певному проміжку  $l_v = 15 \dots 18$  мм за зрізом сопла. Вони мають максимальний імпульс руху в радіальному напрямку за зрізом жиклера, однак, під час просування уздовж осі  $OX$  вектор руху змінюється в бік осі  $OZ$ . Таким чином, у вертикальній площині кут руху частинки відносно осі  $OX$  становить  $\gamma$ , а у площині  $XOY$  вони рухаються паралельно до неї.

Потрапляючи до оболонки струменя та співударяючись із краплинами рідини, в площині  $XOY$  частинки відхилятимуться від осі  $OX$  на кути  $\alpha_i = 2C_1 \arccos\left(\frac{d_{ji}}{d_2(z)}\right)$ , а у напрямку осі  $Z$  – на кут  $\varphi_i = C_2(\pi/2 + \alpha_p/2 - \gamma_a)$ , де  $C_1$ ,  $C_2$  – константи, що визначають умови співударяння;  $C_2 = f(z)$ .

Виявлено [4], що розподіл потоку мас частинок  $M_c$  та ймовірність знаходження частинки у певній точці перетину отвору жиклера площею  $f$  відповідають кривій Гауса, центр групування якої збігається із віссю  $OX$ . Тоді для співвідношення

$$M_c = \int_0^t m \cdot f \cdot dt = \frac{f}{(y_{i+1} - y_i)(z_{i+1} - z_i)} \int_0^t Q_m P(D(y, z)) dt, \quad (2)$$

де  $P(D(y, z)) = \int_{y_i}^{y_{i+1}} \int_{z_i}^{z_{i+1}} a(y, z) dy dz$  – ймовірність потрапляння частинки у конкретну точку перетину, матимемо:

ну точку перетину, матимемо:

Головні припущення моделі такі: усі частинки, що попадають у камеру, прямують до калібрувальної трубки; рідинно-абразивний струмінь складається з оболонки (аерозольно-нещільного потоку) і ядра; розміри і форма ядра відповідають відомому співвідношенню, тобто довжина конічного ядра  $l = 50 \dots 80 d_c$  мм, коли частинки можуть потрапити лише в оболонку; хвильові процеси за співударяння частинок і крапель води можна знехтувати; частинки потрапляють до оболонки струменя на певній відстані від зрізу сопла  $l_v$  під деякими кутами, а напрямом їх руху після співударяння визначають кути  $\alpha$  їх подальшого

$$P(D(y, z)) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{(y-a_y)^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-a_z)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (3)$$

Тут  $a_y, a_z$  – центри розсіювання (математичні сподівання) по осях  $OY$  та  $OZ$ ;  $\sigma_y, \sigma_z$  – середні квадратичні відхилення;  $y, z$  – змінні координати.

При цьому кожна частинка, вдаряючись об поверхню каналу під кутами  $\pi/2 \dots \pi/4$ , викликати пружно-пластичне деформування поверхневого шару, а прямуючи під гострішими кутами, меншими за  $\pi/6 \dots \pi/12$ , формувати на поверхні задирки, які надалі можуть стати центрами зародження та розвитку макродефектів. На основі аналізу взаємодії частинок із потоком за зрізом струминного сопла та за припущення про ямковий механізм деформувально-мікрорізального руйнування визначили можливий об'єм  $W_z$  вилученого з поверхні каналу матеріалу за час  $\tau$ :

$$W_z = \left( \frac{\pi\delta_n^2(3r - \delta_n)}{3} + \sqrt{r^2 - (r - \delta_n)^2} \delta_a \delta_n \right) \frac{M_a}{m} \tau, \quad (4)$$

де  $M_a$  – масова витрата абразиву;  $\delta_n$  – глибина втілення частинки у поверхню;  $\delta_a$  – довжина зони контакту:

$$\delta_n = \frac{R_a m \sin \varepsilon_i}{2k_n z_n H_V} \left( K \left( \frac{L}{Z_c} \right)^{4/3} \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b \rho + M_a / f_k}} \right)^2; \quad (5)$$

$$\delta_a = \frac{m z_n \cos \varepsilon_i}{2k_a \sigma_B} \left( K \left( \frac{L}{Z_c} \right)^{4/3} \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b \rho + M_a / f_k}} \right)^2 - \frac{k_a T_p^2 \sigma_B R_a}{2m z_n}.$$

Тут  $m$  – маса абразивних частинок;  $R_a, H_V, \sigma_B$  – параметри шорсткості, твердості та міцності поверхні;  $z_n$  – зернистість абразивних частинок;  $r$  – радіус частинки;  $L$  – довжина калібрувальної трубки;  $Z_c$  – відстань від зрізу сопла до поверхні обробки;  $K$  – коефіцієнт пропорційності, який враховує співвідношення діаметрів сопла і калібрувальної трубки, а також витрату й дисперсність абразиву;  $p_b$  – тиск перед струминним соплом;  $\rho$  – густина рідини;  $\mu$  – коефіцієнт витрати сопла;  $f_k = \pi d_c^2 / 4$  – площа контакту струменя з перепороною;  $T_p$  – стала, що враховує інерційність мікрорізання;  $\varepsilon_i$  – кут спрямування частинки після взаємодії з оболонкою струменя, що залежить від кутів  $\alpha_i$  та  $\varphi_i$ .

Гідродинамічні явища у каналі трубки аналізували засобами твердотілого моделювання Solid Works, застосовуючи пакет FlowVision. Ядром пакета є блок числового розв'язання рівняння руху рідини в ортогональній системі координат (рівняння Нав'є–Стокса), за яким для певних початкових і граничних умов, заданих користувачем, можна отримати епюри розподілу швидкостей і динамічних тисків у точці контакту струменя з тією чи іншою поверхнею. Нестационарність потоку враховували, залучаючи модель визначення середніх квадратів пульсацій:

$$\frac{\partial g_c}{\partial t} + \nabla(\rho V g_c) = \frac{1}{\rho} \nabla(\mu_t \nabla g_c) + Q_g, \quad \text{де } Q_g = 2,8\mu_t (\nabla g_c)^2 - 2 \frac{\rho \psi g_0}{k};$$

де  $g_c$  – енергія, а  $\psi$  – дисипативна її частка.

Для модельних досліджень розглядали умови витікання водяного струменя під тиском  $p_b = 250$  МПа із трубки діаметром  $D_k = 1,0$  мм. За результатами розрахунків, поданих у вигляді епюр (рис. 3), визначали розподіл тиску уздовж осі каналу та встановили напрямки векторів швидкості струминного потоку у зовнішній (оболонковій) області. За ізолініями швидкості руху потоку та межами ймовірного потрапляння абразивних частинок у потік побудували гістограми розподілу частоти потрапляння частинок на поверхню калібрувальної трубки в радіаль-

ному або осьовому (близькому до осьового) напрямках для окремих зон уздовж калібрувальної трубки (рис. 4). Оскільки механізм та інтенсивність ерозії каналу безпосередньо визначають кути прямування абразивної частинки відносно поверхні, діапазон кутів  $\alpha = [0; \pi/2]$  поділили на проміжки  $[\pi/2; 5\pi/12]$ ;  $[\pi/3; \pi/6]$ ;  $[\pi/12; 0]$ .

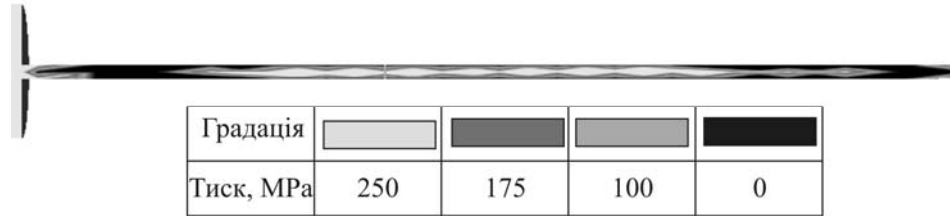


Рис. 3. Розподіл тиску двофазного потоку в каналі калібрувальної трубки.

Fig. 3. The distribution of two-phase flow pressure in the calibration tube channel.

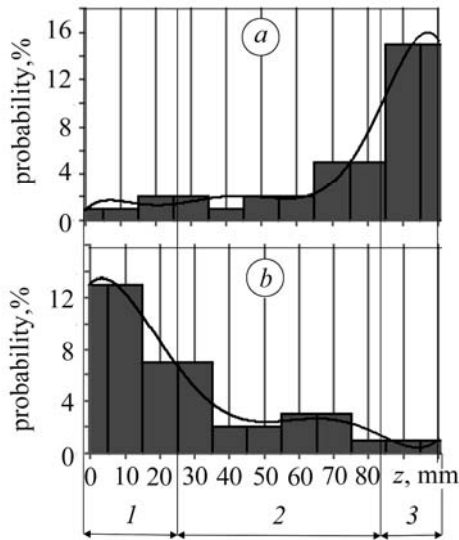


Рис. 4. Гістограми розподілу частоти прямування абразивної частинки під певними кутами до поверхні на різних ділянках каналу: *a* – кути в діапазоні  $[\pi/12; 0]$ ; *b* – в інтервалі  $[\pi/2; 5\pi/12]$ ; *1-3* – зони трубки (див. рис. 1).

Fig. 4. Histograms of the frequency distribution of abrasive particle movement at certain angles to the surface in different parts of the channel: *a* – angles in the range  $[\pi/12; 0]$ ; *b* – interval  $[\pi/2; 5\pi/12]$ ; *1-3* – pipe zones (see Fig. 1).

Гістограми дають можливість виділити уздовж калібрувальної трубки три характерні зони: *1* – високої ймовірності радіальних векторів руху пришвидшених частинок абразиву і інтенсивного ударного навантаження стінок калібрувальної трубки частинками, що рухаються під кутами, близькими до нормальних  $\pi/2$ ; *2* – де можна очікувати рух частинок під кутами, близькими до  $\pi/4$ , тобто максимально проявлятимуться як явища ударного руйнування, так і зношування (мікрорізання); *3* – руху частинок під кутом  $\sim 0^\circ$ , тобто очікують тільки ковзне руйнування – мікрорізання поверхні частинками.

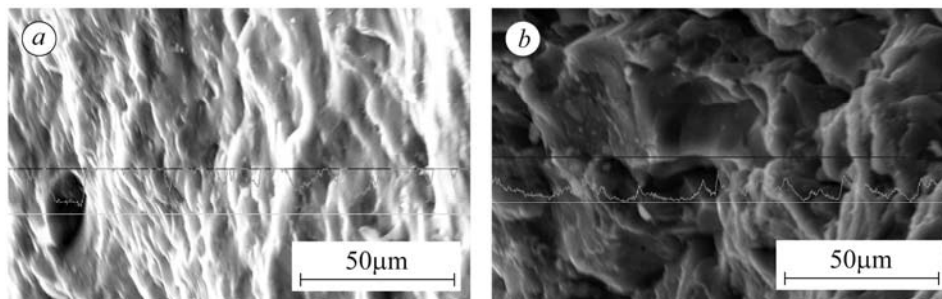


Рис. 5. Мікрорельєф поверхні каналу трубки у зонах *1* (*a*) та *3* (*b*).

Fig. 5. Tube channel surface microrelief in zones *1* (*a*) and *3* (*b*).

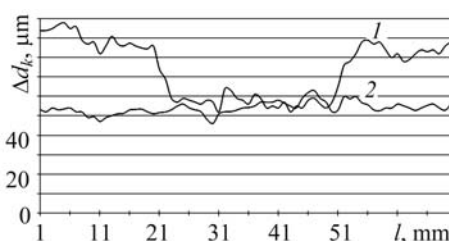
Ці результати підтверджують електронно-мікроскопічні дослідження стану поверхні трубки (рис. 5). Таким чином, максимальне зношування трубки можливе у зонах 1 та 2, а в зоні 3 розвиватимуться, імовірно, лише окремі дефекти.

**Практична реалізація поставленої задачі.** Як свідчать отримані і літературні [22] результати, для підвищення ресурсу трубок потрібно нанести відповідні шари, які задовільно сприйматимуть той чи інший вид абразивного навантаження. Однак труднощі пов'язані з неоднаковим і достатньо малим діаметром отвору трубки: від 4,2 mm на вході до трубки до 0,95...1,20 mm на її зрізі.

Пропонуємо використовувати калібрувальну трубку принципово нової конструкції, виготовлену з двох симетричних частин, поєднаних посадженою із натягом обоймою. На поверхню поздовжнього осьового каналу для запобігання розвитку пошкоджень у зоні інтенсивності дії абразивних частинок наносили зносотривкий фрагментарний шар, що економічно раціональніше, ніж виготовляти всю трубку із зносотривкого і дороговартісного матеріалу.

Рис. 6. Профіль поверхні зношування каналу трубки після різних обробок: 1 – канал без покриву; 2 – з покривом.

Fig. 6. The wear surface profile of the tube channel after various treatments: 1 – uncoated; 2 – coated.



Матеріал трубки – регенований твердий сплав групи ВК із нанесеним методом електроконтактного припікання покривом ФМІ-2 товщиною 1,5 mm (фракційність 30/50 μm) у зоні 1, PVD-покривом TiN у зоні 2 (рис. 6) та цим самим покривом з попереднім азотуванням (N+TiN) на торці трубки, де зафіксовано місце впливу відбитих від поверхні обробки частинок. Товщина азотованого шару 200 μm, покриву TiN – 10 μm.

Так шари надійно захистили канал трубки під час експлуатації впродовж 10 h (рис. 6). Вдалося уникнути зародків інтенсивного руйнування на поверхні каналу, хоча проявилися незначні дефекти в зонах стикування різних шарів уздовж нього. Крім цього, торцевий PVD-покрив після азотування товщиною 200 μm практично зник, хоча пошкодження каналу розвивалося без суттєвої зміни його діаметра і досить рівномірно. Тому, порівняно з відомими, тривкість розроблених калібрувальних трубок, коли розмір калібрувального отвору не збільшується і, відповідно, забезпечується точність оброблення, зросла в середньому в 1,6–2 рази.

## ВИСНОВКИ

Побудовано модель течії двофазного високошвидкісного гідроабразивного різального струменя у протоковій частині калібрувальної трубки, яка дала можливість довести існування певних зон з різною інтенсивністю пошкодження каналу. На цій основі запропоновано шляхи підвищення ресурсу трубок та створено нову конструкцію трубки, яка передбачає нанесення фрагментарних функціональних шарів на поверхні каналу. Встановлено, що гарантована тривкість пропонує калібрувальних трубок у 1,6–2 рази вища, ніж існуючих.

**РЕЗЮМЕ.** По результатам моделирования формирования двухфазного потока и его движения в калибрующей трубке установлено, что износ проточной части трубки имеет различные интенсивность и характер, а также выявлены определенные функциональные зоны трубок. Показано, что обеспечить геометрические параметры можно нанесением соответствующих защитных слоев, вследствие чего ресурс трубок повышается в 1,8–2 раза.

**SUMMARY.** On the basis of the model of two-phase flow formation and its movement in the calibration tube it is found that the tube wear has different intensity and character. The spe-

cific functional area of the tubes is also identified. It is shown that it is possible to provide the geometrical parameters of the tubes by using the appropriate protective layers. As a result the tube resource increases in 1.8–2 times.

1. *Hashish M.* Inside AWJ Nozzles // WJTA American Waterjet Conference (August 17–19, 2003). – Houston, Texas, 2003. – P. 243–260.
2. *Galecki G. and Mazurkiewicz M.* Hydroabrasive cutting head, energy transfer efficiency // Proc. of the 4<sup>th</sup> American Waterjet Cutting Conf. – University California, Berkeley, 1987. – P. 109–111.
3. *Дудюк В. О.* Забезпечення надійності процесу гідроабразивного різання на основі ідентифікованих моделей власних і параметричних відмов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 24 с.
4. *Саленко О. Ф., Дудюк В. О.* Поліпшення стабільності процесу гідроабразивного різання конструктивними засобами // Вісник СевНТУ. – 2010. – Вип. 107: Машиноприладобудування та транспорт. – С. 197–202.
5. *Саленко А. Ф., Дудюк В. А.* Надежность процесса гидроабразивного резания // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2010. – № 5. – С. 22–26.
6. *Саленко О. Ф., Фомовська О. В., Доценко В. Г.* Підвищення якості різку листових матеріалів гідроабразивним струменем малого діаметра // Високі технології в машинобудуванні. – 2008. – № 2. – С. 115–124.
7. *Daniel I. V.* Experimental studies of water jet impact on rock and rocklike // Workshop on application of high pressure water jet cutting technology. – University of Missouri at Rolla, Rolla. – 1975. – P. 124–126.
8. *Tutluoglu L., Hood M., and Barton C.* An investigation of the mechanism use of water jet assistance on the rock cutting process // Proc. 24<sup>th</sup> Symp. Rock Mechanics. Society of Petroleum Engineers (20–22 June, 1983). – Texas, 1983. – P. 743.
9. *Hood M., Nordlund R., and Thimons E.* A study of rock erosion using high pressure water jets // Int. J. Rock Mech. – 1990. – 27, № 2. – P. 77–86.
10. *Бадах В. Н., Бочаров В. П., Струтинский В. Б.* К анализу кавитационных явлений в проточной части гидравлических струйных устройств // Пневматические и гидравлические устройства и системы управления. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – С. 298–308.
11. *Гейчук В. Н., Струтинский В. Б.* Многофункциональные блочно-модульные гидравлические струйные устройства // Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации специалистов промышленной гидравлики и пневматики. – К., 1989. – С. 235–247.
12. *Дудюк В. О.* Аналіз динамічного навантаження елементів зони гідрорізання із використанням прикладного пакета FlowVision // Вісник Кременчуцьк. держ. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 6/2010 (65); ч. 1. – С. 59–62.
13. *Проволоцкий А. Е.* Струйно-абразивная обработка деталей. – К.: Техника, 1989. – 178 с.
14. *Саленко О. Ф., Петко І. В., Третьяков О. В.* Гідро- та гідроабразивна обробка: теорія, технологія, обладнання. – К.: Ін-т змісту і методів навчання, 1999. – 484 с.
15. *Семінська Н. В.* Вдосконалення гідроструминних технологій з врахуванням особливостей формування струменів високого тиску: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: НТУУ “КПІ”, 2008. – 22 с.
16. *Стоцько З. А., Стефанович Т. О.* Дослідження розподілу кінетичної енергії робочого середовища при струминному обробленні деталей машин // Міжвузів. зб. “Наукові нотатки” (За напрямом “Інженерна механіка”). – 2007. – № 20. – С. 482–485.
17. *Струтинський В. Б.* Математичне моделювання процесів та систем механіки. – Житомир: Інж.-техн. ін-т, 2001. – 612 с.
18. *Фомовська О. В.* Візуалізація формоутворення при гідроабразивному різанні на основі енергетичних моделей руйнування // Вісник Кременчуцьк. держ. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2009. – Вип. 2; ч. 1. – С. 27–31.
19. *Яблуновский Я. Ю.* Повышение эффективности гидроабразивной обработки на основе учета энергии двухфазной режущей струи: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Рыбинск, 2012. – 16 с.
20. *Яхно Б. О., Семинская Н. В.* Влияние геометрических и прочностных параметров струеформирующих устройств на компактность струи // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2007. – № 3 (109). – С. 143–148.
21. *Hashish M.* AWJ Studies // 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Water Jetting, BHR (16–18 October, 2002). – Aix en Provence, France, 2002. – P. 583–593.
22. *Михайлов А. Н.* Разработка технологий на основе функционально-ориентированного подхода. – Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2008. – 450 с.

Одержано 14.04.2014