

Висновки

Розроблена математична модель дозволяє додатково враховувати умови експлуатації рідинного-магнітного демпфера і вплив його параметрів на процес демпфування. Це, в свою чергу, дозволить забезпечити вибір раціональних конструктивних параметрів в залежності від змінних умов експлуатації.

Список літератури

1. Узунов О.В. Вплив температурних змін характеристик дроселів на роботу гідравлічного амортизатора / О.В. Узунов, І.В. Ночніченко, О.С. Галецький / Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. – Київ, 2009. Вип. 57. – С.157–163.
2. Узунов О.В. Експериментальне дослідження адаптивної властивості дроселю гідравлічного амортизатора / О.В. Узунов, І.В. Ночніченко // Тези доповідей Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка та технологія – 2012». – Севастополь, 2012. – Частина 2. – С. 23-24.
3. Узунов О. В. Математична модель робочого процесу у гідравлічному автомобільному амортизаторі / І. В. Ночніченко, О. В. Узунов // Науково-технічний збірник "Гідравліка і гідротехніка" Національного транспортного університету України. – Київ, 2011. – № 65. – С. 100-111.
4. Узунов О.В. Експериментальне дослідження адаптивної властивості дроселю гідравлічного амортизатора / О.В. Узунов, І.В. Ночніченко // Тези доповідей Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка та технологія – 2012». – Севастополь, 2012. – Частина 2. – С. 23-24.

УДК 621

**Ю.О. Литвин, бакалавр,
Т.В. Тарасенко, к.т.н., доц.**

Національний авіаційний університет

МОДЕЛЮВАННЯ КАВІТАЦІЙНОГО СТРУМЕНЮ В ДРОСЕЛЬНОМУ ПРИБОРІ

Під час витікання рідини в гідравлічних системах, якщо потік дроселюється зі значним перепадом тиску, виникає кавітація. В гідроприводах кавітація, як правило, явище небажане. Але можна вказати і на приклади використання цього явища для реалізації функцій керування витратою рідини, генерування коливань тиску, для очищення [8], емульгування рідин, інтенсифікації хімічних реакцій [5]. Важливо зауважити, що корисна функція реалізується в кавітаційному пристрої наявним чином без запровадження допоміжних елементів (кранів, золотників, клапанів та ін.). Для ефективного використання кавітаційних явищ у технологічних процесах необхідно дослідити механізм виникнення кавітаційних пульсацій тиску.

Схематично зародження кавітаційної зони може бути представлено наступною спрощеною схемою (рис. 1). Каверни виникають у потоці рідини, що витікає через насадок Вентурі у момент зменшення тиску у стисненому перерізі. У цьому перерізі тиск падає до тиску „порогу” кавітації [11]. Тиск „порогу” кавітації дещо перевищує тиск насичених

парів рідини внаслідок перенасичення робочої рідини „ядрами” кавітації у вигляді мікроскопічних бульбашок вільного повітря (розміри порядку 10 мкм.). Каверни локалізуються у центрі вихорів, що генеруються у застійній області, і зносяться вниз по потоку. Із збільшенням швидкості течії рідини через насадок збільшуються вихорі у застійній зоні і збільшується кількість каверн, що мігрує вниз по потоку. Об’єм газової фази постійно збільшується внаслідок сепарації газових бульбашок і дегазації рідини. Так утворюються газові пробки, які переходять у транзитний струмінь і ділять його на частини. Струмінь набуває „дирчату” структуру (рис. 2).

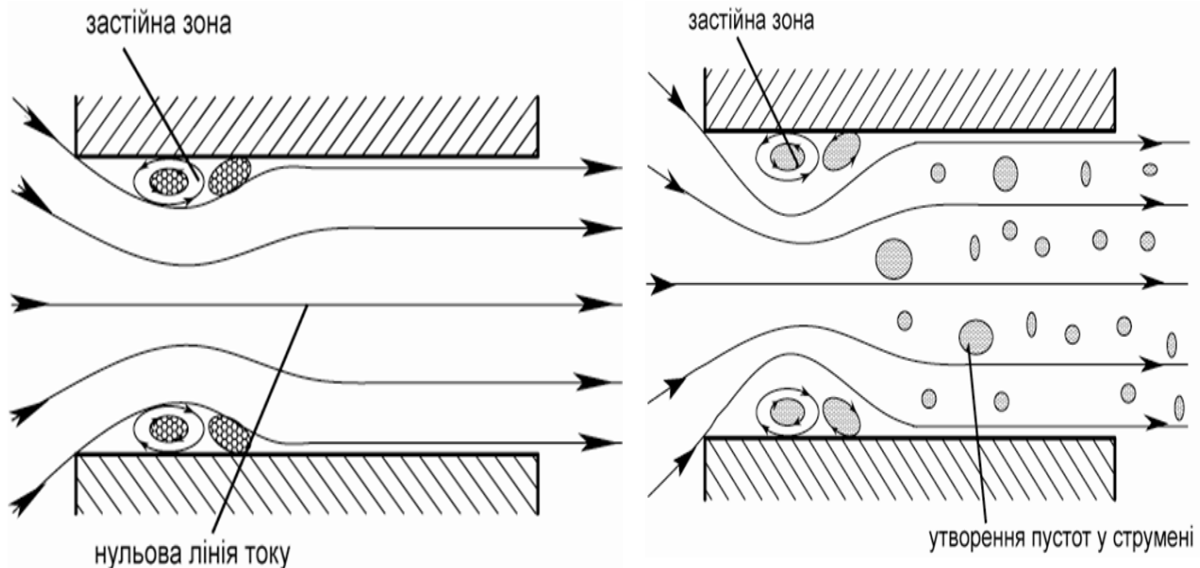


Рисунок 1 - Схема утворення початкової стадії кавітаційної зони у насадку Вентурі

Рисунок 2 - Утворення повітряних каверн у потоці робочої рідини

Розриви суцільності або стискають переріз струменю, або переривають струмінь повністю (рис. 3). Швидкість струменю при стабільному значенні витрати зростає до значення, яке відповідає перепаду $\Delta p_{кр} = p_{вх}^{абс} - p_{кав}$. На границі кавітації швидкість витікання буде відповідати перепаду тиску $\Delta p = p_{вх} - p_{вих}$.

У перерізах потоку, де суцільність течії відновлюється швидкість потоку знову набуває значення, яке мала на границі кавітації (рис.3.). Частка повітря, яке виділилось настільки мала (десяті частки відсотка), що це не впливає на швидкість течії у межах відновленого потоку.

Каверни з повітрям потрапляють у зону відновлення статичного тиску і починають інтенсивно захлопуватись. Вільне повітря у бульбашці раптово переходить у робочу рідину. Струмінь рідини у момент замикання каверни набуває прискорення, і відбувається співударяння сусідніх об’ємів рідини один по одному, що супроводжується значними пульсаціями тиску в об’ємі рідини, що протікає через насадок, а також, локальними збільшеннями тиску і температури рідини у мікро об’ємах.

На зрізі насадка Вентурі, який встановлено у циліндричному каналі, виникає застійна зона, яка виникає внаслідок нерівномірного розподілення поля швидкостей по перерізу каналу. У цій зоні генеруються потужні тороїдальні вихрові структури. У центрі даної вихрової структури зосереджено повітря. Дані вихрові структури відносяться транзитним потоком і бульбашки повітря, що розташовані в середині вихору, починають захлопуватись, що спричиняє значні збурення тиску рідини у потоці (рис. 4).

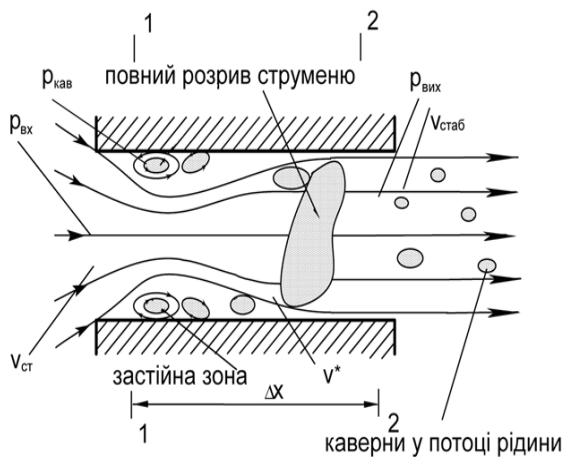


Рисунок 3 - Схема повного розриву струменю у циліндричному насадку

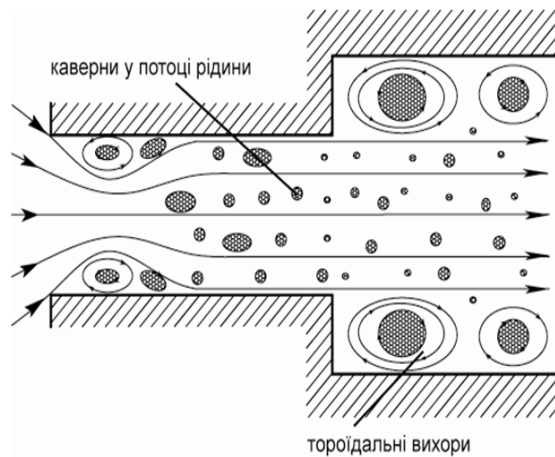


Рисунок 4 - Схема утворення вихрових структур на зрізі насадка Вентурі

Характерна особливість кавітаційного витікання рідини полягає в тому, що витрата рідини через дросельний пристрій стабілізується з моменту початку критичного перепаду тиску [7]. На рис. 5 показано витратні характеристики досліджуваних дросельних пристроїв: із конфузорно-дифузорним каналом (крива 1), насадок Борда (крива 2), циліндричний насадок (крива 3), прямокутний канал (крива 4), діафрагма (крива 5). Вимірювання виконано при постійному вхідному і змінному вихідному тисках.

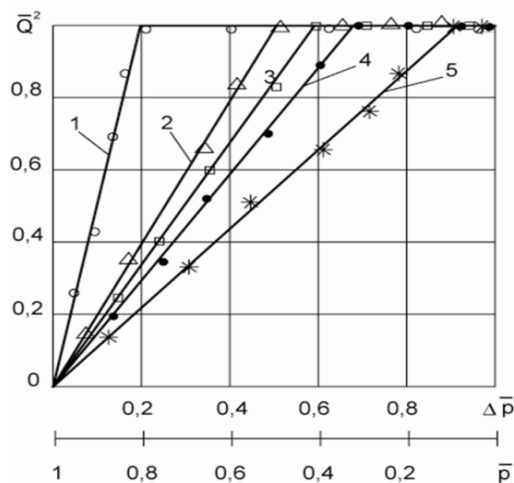


Рисунок 5 - Кавітаційні характеристики витікання рідини АМГ-10 через дросельні пристрої (1 – насадок конфузорно-дифузорного типу; 2 – насадок Борда; 3 – циліндричний насадок; 4 – насадок із прямокутним каналом; 5 – діафрагма)

Структуру кавітаційних струменів у високонапірному дросельному каналі можна проаналізувати на основі даних чисельного моделювання з використанням CFD-модуля Fluent програмного комплексу ANSYS, також аналізу кінограм, які виконані із частотою зйомки порядку 10^{-5} с.

Для визначення положення кавітаційних областей було проведено чисельний розрахунок з використанням програмного продукту ANSYS 19.2 з CFD-модулем Fluent. В ANSYS Fluent використовується метод кінцевих об'ємів. Складові розрахункової сітки мають форму паралелепіпедів, значення змінних розраховуються у центрах комірок і у вузлах розрахункової сітки. Загальна кількість об'ємних елементів в розрахунковій сітці складає 251590 елементів, які утворюють 787689 розрахункових площадок і 285296 вузлів.

Для обраної ділянки при визначенні граничних та початкових умов вказувалися наступні параметри:

- базова модель мультифазної рідини – двофазна рідина, основна фаза – рідка вода, вторинна фаза – водяна пара;
- модель турбулентності – k-ε;
- тип взаємодії фаз – кавітація;
- математична модель - Schnerr and Sauer cavitation model.

На тверді поверхні ставилася гранична умова - тверда непроникна адіабатична стінка. На вхідній та вихідній поверхнях задавалися граничні умови за тиском: тиск на вході $p_{вх} = 1039860$ Па, тиск на $p_{вих} = 259965$ Па, що відповідає $\Delta p = 0,75$.

В результаті проведення чисельного моделювання отримано ряд характеристик, які представлені у вигляді кольорних полів розподілу параметрів та у формі ізоліній. Чисельне моделювання дає якісну картину процесів, що відбуваються в кавітаційній зоні.

Зони виникнення кавітації можна визначити за параметрами статичного тиску і величинами густини рідини в розрахунковій області. Для цього було отримано розподіл статичного тиску вздовж каналу (рис.6). Статичний тиск, який відповідає умовам виникнення кавітації (104792 Па) розповсюджується майже по всій довжині каналу за виключенням зон на початку та наприкінці вузького перерізу.

На рис.7 показано візуалізацію розподілу об'ємної частки рідини в суміші за перерізами вздовж ділянки, за значеннями яких також можна виявити зону виникнення кавітації. Візуалізація даних чисельного моделювання співпадає з візуалізацією отриманою при проведенні фізичного експерименту.

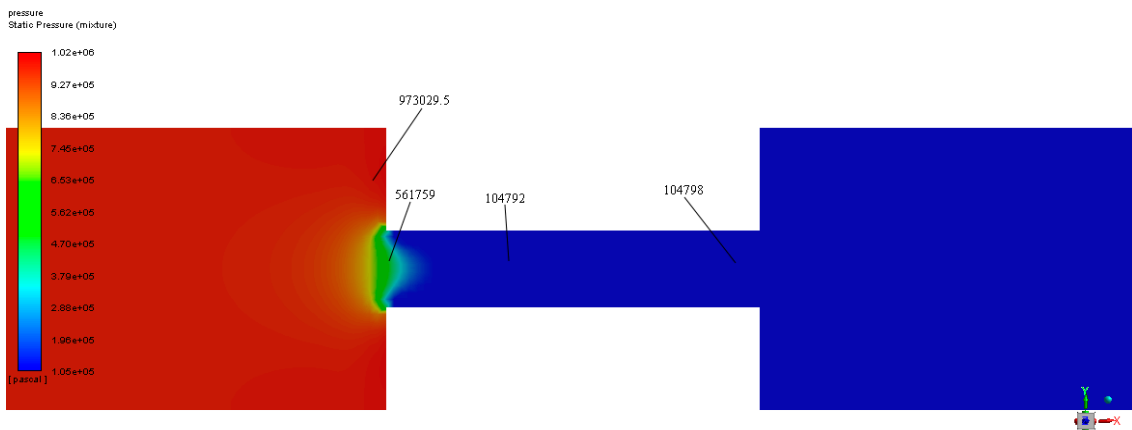


Рисунок 6 - Розподіл статичного тиску в центральному перерізі вздовж каналу, Па

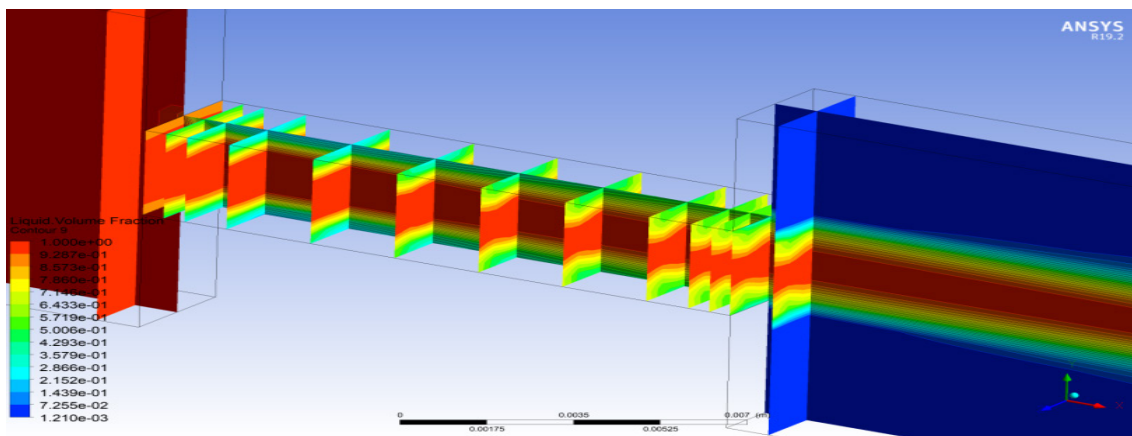


Рисунок 7 - Розподіл об'ємної частки рідини на розрахунковій ділянці в поперечних і поздовжньому перерізах вдовж каналу

Візуальні спостереження за течією рідини у дроселі із прямокутним каналом дозволяють спостерігати за змінами у структурі кавітаційного потоку. У діапазоні перепадів тиску $0 < \overline{\Delta p} < 0,31$ ($p_{\text{атм}}^{\text{атм}} = 1,06$ МПа, $Re = 2620$) потік вздовж усього каналу має прозорий вигляд. Але зниження тиску за кавітаційним генератором приводить до викривлення ліній току рідини на вхідній ділянці дросельного каналу і переходу від безвідривної течії до відривної. Застійні області у потоці за вхідними крайками стають видимими при $Re > 2620$. У об'ємі застійних областей малими бульбашками газу виділяються вихорі. Перші розриви суцільності в потоці виникають при перепаді тиску $\overline{\Delta p} = 0,58$ ($Re = 4855$). Картина течії, що відповідає початку кавітації приведена на рис. 8. Зйомка виконана у відзеркаленому світлі із експозицією $f_e = 2 \cdot 10^{-3}$ с.

Перебудова у структурі потоку, що проявляється у виникненні на стінках каналу за вхідними крайками бульбашок газу, відбувається при $\overline{\Delta p} = 0,64$. Вихровими течіями бульбашки переміщуються вздовж каналу і виносяться потоком. Із збільшенням перепаду тиску до $\overline{\Delta p} = 0,70$ окремі розриви суцільності зливаються і створюють приєднані каверни.

У момент зародження кавітації приєднані каверни нестационарні. Енергії потоку не вистачає для стійкого відриву струменю від стінок каналу, що викликає періодичне руйнування каверн зворотними течіями. Із виникненням приєднаних каверн у ядрі потоку виникають розриви у вигляді факелів, що відносяться течією. При перепадах тиску $\overline{\Delta p} = 0,70$ ($Re = 5425$) приєднані каверни набувають стійкості, а потік поміж ними розвивається факелоподібними прошарками.

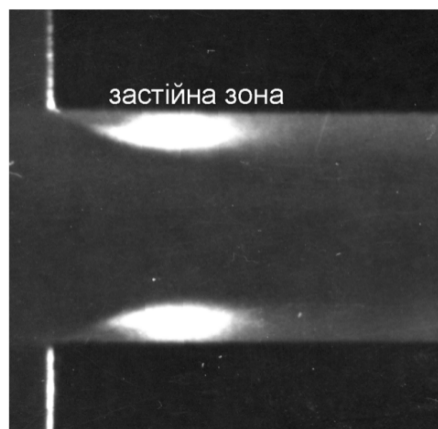


Рисунок 8 - Утворення застійних зон у потоці рідини $\overline{\Delta p} = 0,58$; збільшення 23 кратне

Потік залишається суцільним тільки на вхідній ділянці. У діапазоні перепадів тиску $\overline{\Delta p} = 0,71 - 0,90$ протяжність зони кавітації збільшується при незмінній її структурі. На рис. 9 показано динаміку розвитку кавітаційної зони за плоским дроселем.

У діапазоні ступеня розвитку кавітації $0,94 > \overline{\Delta p} > 0,70$ спостерігається режим розвинутої кавітації у дросельному каналі (приєднана каверна замикається на стінках дроселя). У зливному каналі спостерігається утворення вихрових структур, які візуалізуються газовою фазою. Пониження протитиску сприяє розповсюдженню кавітаційної зони по потоку і збільшенню діаметрів вихорів. Не спостерігається витікання гомогенного двохфазного потоку. Кавітаційна зона являє собою сукупність каверн, що взаємодіючи переміщуються по потоку. Кавітація у самому дросельному каналі є джерелом зародків каверн у вигляді бульбашок нерозчиненого повітря.

Суперкавітаційний режим витікання відбуваються при відносному перепаді тиску $\overline{\Delta p} > 0,94$. Приєднана каверна виходить за межі дросельного каналу і у зливному каналі

спостерігаються процеси розвитку і руйнування каверн, що переміщуються, а також, вентиляція приєднаної каверни аналогічно розвинутої кавітації у дросельному каналі.

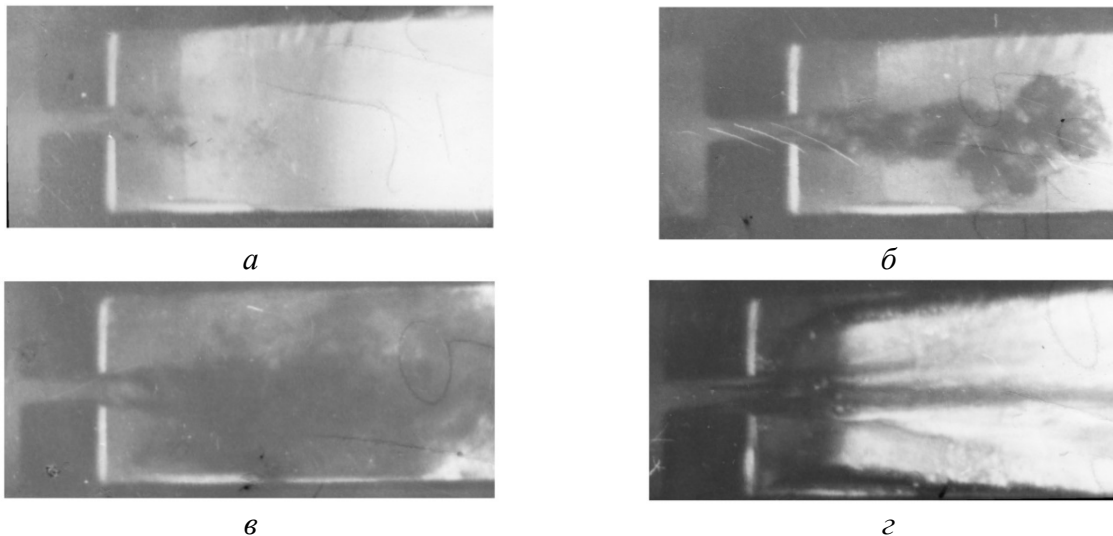


Рисунок 9 - Структура кавітаційної зони за прямокутним дроселем
(а – $\overline{\Delta p}=0,71$; б – $\overline{\Delta p}=0,80$; в – $\overline{\Delta p}=0,90$; г – $\overline{\Delta p}=0,98$)

Особливістю розвинутих стадій кавітації є те, що поряд із квазістійкими приєднаними кавернами у потоці виникають каверни, що рухаються, несферичної форми. При візуальному спостереженні каверни, що рухаються мають вигляд факелоподібних прошарків, що розмивають потік поміж приєднаними кавернами. Струмінь рідини, що відривається на вхідних крайках дроселя, має додатковий розрив у шарі, що розділяє потік і приєднані каверни. У фазі росту спостерігається одночасне витягування каверни по потоку і зростання її поперечного перерізу. Максимальна довжина такої каверни досягає довжини кавітаційної зони, а потік може розірватись по всьому живому перерізу. Внаслідок цього канал дроселя періодично перекривається парогазовими пробками. Причому дані парогазові пробки представляють собою вихрові структури. У дросельному каналі утворюється два вихори, які рухаються у напрямку зливу. Дані вихори утворюються внаслідок того, що каверни, рухаючись у область відновленого тиску починають деформуватись. Деформація відбувається із хвоста каверни. Хвіст скорочується, збільшуються поперечні розміри каверни, виникає нерівномірне поле швидкостей і дросельному каналі. У дросельному каналі насадка має місце низький тиск, тому вихрові структури у дросельному каналі, за рахунок свого обертання, відцентровою силою зрівноважують тиск на виході насадка. Режим течії рідини набуває снарядного характеру (реалізується дискретна течія).

Можна зробити висновок, що результати чисельного моделювання в цілому відповідають даним експериментальних досліджень кавітаційних струменів. Згадані моделі розрахунку можуть бути використані для швидкої оцінки параметрів високонапірних дросельних пристроїв та їх кавітаційних властивостей без необхідності створення експериментальних стендів.

Список літератури

1. Pilipenko, V.V. (1989), Kavitacionny`e kolebaniya, Naukovadumka, Kiev, Ukraine.
2. Glazkov, M.M. (1990), "Model` kavitacionnoj zony` drossel`ny`x ustrojstv gidroprivoda", NTK Gidravlikaigidroprivodmashin, avtomatovipromy`shlenny`xrobotov v mashinostroenii, Kiev, pp. 24-25.

3. Oba, R. and Miyakura, X. (1987), "Stochastic behavior (randonness) of acoustic pressure pulsses in the near subcavitating range", Intern. Journal, pp. 581 – 586, DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1987.30.581>.

4. Ivchenko, V.M. (1980), *Gidrodinamika mnogofaznykh zhidkosti. Kavitatsiya*, KPI, Krasnoyarsk, Russia.

5. Puzik, O., Zaionchkovskiy, G. and Tarasenko, T. (2013), Experimental test-bench for reseaching properties of fuel-lubricant materials, Proceedings of the National aviation university, No.1, (54), pp. 78-81.

6. Hlazkov, M.M., Makarenko, M.H. and Tarasenko, T.V. (2007), "Matematychna model' rozmakhukavitatsiynykh pul'satsiytysku", Materialy IX Mizhnarodnoy inaukovotekhnichnoy konferentsiyi „Avia – 2007”, Vol. 2. NAU, Kyiv, Ukraine, pp. 60–62.

7. Hlazkov, M.M., Lanetsky, V.H., Kuryukov, V.N. and Tarasenko, T.V. (2003), "Vlyyanyekavytatsyynahydravlycheskyekharakterystykydrossel'nykhustroystvhydropryvoda", Visnyk SumDU Ser. Tekhnichninauky, No.13 (59), pp. 53–59.

8. Hlazkov, M.M., Kurinkov, V.M. and Tarasenko, T.V., Zayavnykipatentotrymach NAU (2002), "Sposib ochyshchennya vnutrishn'oyi poverkhni truboprovodu ta prystryi dlya yoho zdiysnennya", Pat. 51481 Ukrayina B08B9/27, No. 2002042866.

9. Glazkov, M.M. and Pilipenko, S.V. 1988), "Metodika spektral'nogo analiza kavitatsionnykh pul'satsii davleniya", Proektirovanie i ekspluatatsiya promyshlennykh gidroprivodov i system gidropnevmoavtomatiki, 17–18 March 1988, Penza, Russia, pp. 72–73.

10. Pilipenko, V.V. and Zadontsev, V.A. (1976), *Ob odnommekhanizmeavtokolebanii v gidravlicheskoisisteme s kavitatsionnoitrubkoiVenturi*, Naukovadumka, Kyiv, Ukraine.

11. Glazkov, M.M., Lanetskii, V.G., Makarenko, N.G. and Chelyukanov, I.P. (1987), *Kavitatsiya v zhidkostnykhsistemakhvozdushnykhsudov*, KIIGA, Kyiv, Ukraine.

12. Tarasenko, T.V., Badach, O., Puzik, K. (2013), Krayushkina Functional units based on cavitation effects for hydraulic systems of vehicles, Science – Future of Lithuania: 16th Conference for Junior Researchers, May 8, 2013, Vilnius, Lithuania, pp. 50-54.

13. Tarasenko, T.V., Romanenko, V.G. and Badakh, V.N. (2015), *Vozniknovenie kavitatsii v ob'emnom nasose*, Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu KhPI, Seriya: Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty, No. 3. pp. 112–120.

УДК 621.924.93

**А.П. Багач, студент,
І.О. Ящук, студент,
О.П. Ящук, ст. викладач**

Національний авіаційний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГІДРОАБРАЗИВНОГО СТРУМИННОГО РІЗАННЯ ШЛЯХОМ ПІДБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ АБРАЗИВУ

Промисловість сучасного світу, в тому числі провідні галузі народного господарства, передбачають ряд вимог щодо пошуку принципово нових методів обробки, які базуються на прогресивних фізичних і фізико-технічних принципах, а також володіють високою енергетичною ефективністю, широкими технологічними можливостями та є екологічно безпечними.

Даним вимогам найбільш повно відповідає метод струминної обробки матеріалів. Щоб надати заготовці необхідної форми, використовують гідрорізання – різання