

---

## CONTENTS

---

<b>V. Semenenko, O. Naumova</b> Prediction of the unsteady ventilated partial cavities .....	7
<b>I. Orynyak, Y. Bai</b> Application of exponential functions in weighted residuals method in structural mechanics. Part 1: axisymmetrical shell problem.....	19
<b>O. Luhovskyi, A. Zilinskyi, A. Shulha, A. Lavrinenkov, I. Gryshko, I. Bernyk</b> Experimental study of materials resistance to cavitation erosion .....	29
<b>A. Rudenko, V. Khvorost</b> Operability study of overhung pump being under special dynamic loads .....	34
<b>A. Stepin</b> Effectiveness of engineering service organizations in global projects execution .....	43
<b>J. Kleiman, Z. Iskanderova</b> Surface modification of flat cable conductors: a path to withstand the aggressive space environment.....	48
<b>R. Kachmar, G. Kryvov, D. Jermolin, V. Matvijenko, V. Baklan, A. Rudjko</b> Updating of technological base of repair of components from polymer composite materials of airframe .....	57
<b>L. Nyrkova, S. Osadchuk, T. Labur, Y. Borisenko</b> Corrosion resistance of the welded junction of aluminum alloy of the Al-Mg-Si-Cu system .....	64
<b>V. Maiboroda, D. Dzhulii, A. Zelinko, A. Burikov</b> Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. 2. The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magneto-abrasive machining.....	73
<b>A. Sagalovych, V. Popov, V. Sagalovych, S. Dudnik, A. Edinovych, A. Stupakov</b> Development of Avinit duplex technology to increase the wear resistance of the gearbox separator .....	82
<b>V. Babak, B. Lyashenko, V. Shchepetov, S. Kharchenko</b> Heat protective coatings on niobium alloys .....	88
<b>R. Turmanidze, G. Popkhadze, K. Inasharidze</b> Improving the performance of human hip implants by improving the processing quality and geometric accuracy of their spherical surfaces.....	99
<b>V. Kaliuzhnyi, O. Kaliuzhnyi, K. Marchuk</b> Calculation of the size of a hollow workpiece with a thin wall with interchangeable thickness and determination of the parameters of its crimping in a matrix with a cone-cylindrical deforming surface.....	106
<b>O. Litvin, S. Pankov, I. Yashchuk</b> Algorithmization of the combined approach to the synthesis of engineering solutions.....	113
<b>I. Perepichai, A. Perepichai, C. Zvorykin</b> Stress-strain state during recovery objects with corrosion defects by welding.....	120

## ЗМІСТ

<b>V. Semenenko, O. Naumova</b>	
Prediction of the unsteady ventilated partial cavities .....	7
<b>I. Ornyak, Y. Bai</b>	
Application of exponential functions in weighted residuals method in structural mechanics. Part 1: axisymmetrical shell problem.....	19
<b>O. Луговський, А. Зілінський, А. Шульга, А. Лавріненко, І. Гришко</b>	
Експериментальне дослідження стійкості конструкційних матеріалів до кавітаційної ерозії .....	29
<b>A. Руденко, В. Хворост</b>	
Исследование работоспособности насосов консольного типа при особых динамических воздействиях .....	34
<b>A. Stepin</b>	
Effectiveness of Engineering Service Organizations in Global Projects Execution .....	43
<b>J. Kleiman, Z. Iskanderova</b>	
Surface Modification of Flat Cable Conductors: a Path to Withstand the Aggressive Space Environment.....	48
<b>P. Качмар, Г. Кривов, Д. Єрмолін, В. Матвієнко, В. Баклан, А Рудько</b>	
Актуалізація технологічного базису ремонту складових частин із полімерних композиційних матеріалів планера літака .....	57
<b>L. Nyrkova, S. Osadchuk, T. Labur, Y. Borisenko</b>	
Corrosion resistance of the welded junction of aluminum alloy of the Al-Mg-Si-Cu system .....	64
<b>V. Maiboroda, D. Dzhulii, A. Zelinko, A. Burikov</b>	
Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads. 2. The influence of the design of the working surfaces of the heads on the effectiveness of the magnetoabrasive machining.....	73
<b>A. Sagalovych, V. Popov, V. Sagalovych, S. Dudnik, A. Edinovich, A. Stupakov</b>	
Development of Avinit duplex technology to increase the wear resistance of the gearbox separator .....	82
<b>V. Babak, V. Lyashenko, V. Shchepetov, S. Kharchenko</b>	
Heat Protective Coatings on Niobium Alloys .....	88
<b>P. Турманидзе, Г. Попхадзе, К. Инашаридзе</b>	
Улучшение эксплуатационных характеристик имплантатов тазобедренных суставов человека путем повышения качества обработки и геометрической точности их сферических поверхностей.....	99
<b>В. Калюжний, О. Калюжний, К. Марчук</b>	
Розрахунок розмірів вихідної порожнистої заготовки із тонкою стінкою змінної товщини та обтиск в матриці з конусно-циліндричною деформуючою поверхнею .....	106
<b>О. Литвин, С. Паньков, І. Ящук</b>	
Алгоритмізація комбінованого підходу до синтезу інженерних рішень .....	113
<b>І. Перепічай, А. Перепічай, К. Зворикін</b>	
Напружено-деформований стан при відновленні об'єктів з корозійними дефектами шляхом зварювання .....	120

# Експериментальне дослідження стійкості конструкційних матеріалів до кавітаційної ерозії

О. Ф. Луговський<sup>1</sup> • А. І. Зілінський<sup>1</sup> • А. В. Шульга<sup>1</sup> • А. Д. Лавріненков<sup>1</sup> •  
І. А. Гришко<sup>1</sup> • І. М. Берник<sup>2</sup>

Received: 17 October 2020 / Accepted: 24 November 2020

**Анотація.** У статті розглянуті проблеми забезпечення довговічності ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання. Представлені результати планування експерименту, які дали змогу правильно побудувати натурне дослідження та обрати конструкційні матеріали. Обрано такі експериментальні матеріали, як 30ХГСА, СЧ20, Ф4, 08Х18Н10Т та ЛС59\_ІІІ для натурального експерименту, оскільки всі ці конструкційні матеріали мають близькі значення модуля Юнга. Показаний хід та проведення натурального експериментального дослідження ерозійного руйнування заявлених конструкційних матеріалів, з яких можуть бути виготовлені ультразвукові випромінювачі і деталі кавітаційних камер. Проаналізовано поведінку досліджуваних зразків та залежність втрати їх маси від часу обробки при різних потужностях ультразвукового кавітатора. Дослідження дозволило визначити найкращі матеріали з точки зору кавітаційної міцності при наявності втомних напружень.

**Ключові слова:** ультразвукова кавітація, ультразвукові коливання, експеримент, кавітаційна міцність матеріалів, кавітаційні камери, кавітаційна ерозія.

## Вступ

В наш час багато технологічних процесів ґрунтуються на використанні ефектів, які супроводжують явище ультразвукової кавітації в рідині. До них належать ультразвукове розпилення [1, 2], очищення твердих та еластичних поверхонь [3–5], фільтрація [6–8], дегазація, перемішування на молекулярному рівні, активування рідин, екстрагування [9], знезараження [10] і т.п. Усі ці технологічні процеси широко застосовують в машино- та приладобудуванні, хімічній та харчовій промисловостях, сільському господарстві та медицині [11–13].

Дуже важливу позицію у всіх технологічних процесах посідає саме фільтрування робочої рідини. Від нього залежить як ефективність технологічних

процесів, так і надійність та якість роботи гідравлічних систем. Тому, проаналізувавши всі відомі методи фільтрування, слід відзначити, що саме спосіб фільтрування рідини в ультразвуковому полі має суттєві переваги над іншими. Цей спосіб реалізується кількома варіантами: з використанням фільтрувальної перегородки або без неї, в полі, яке утворене стоячою ультразвуковою хвилею [1]. Якщо використовувати перший варіант, то широкому застосуванню цього способу фільтрування заважає декілька факторів, а саме недостатня вивченість впливу частинок забруднювача на стійкість та довговічність конструкційних матеріалів. Не дивлячись на велику кількість робіт з вивчення механізмів кавітаційної ерозії [14–16] та ін., питання вивчено не повністю. Дослідження цих процесів ускладнюється їх швидкоплинністю (порядок  $10^{-6}$  с), а також тією обставиною, що кавітаційна ерозія протікає у малих об'ємах. Колапс каверни розпочинається із розмірів  $10^{-2}$  мм. Додаткові ускладнення створюють високі локальні тиски та висока температура. Більшість дослідників відмічають наявність двох основних видів зношування металів: механізм ударної хвилі і механізм кумулятивних мікроструменів. Тому спробуємо відслідкувати поведінку декількох досліджуваних модельних матеріалів, таких

✉ О. Ф. Луговський  
toll-sonic@ukr.net

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

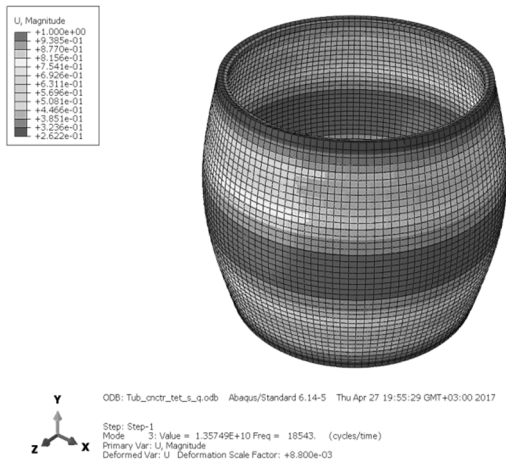
<sup>2</sup> Вінницький національний аграрний університет,  
Вінниця, Україна

як: сталь 30ХГСА, чавун СЧ20, фторопласт Ф4, сталь 08Х18Н10Т та латунь ЛС59\_ІП, провівши натурний експеримент.

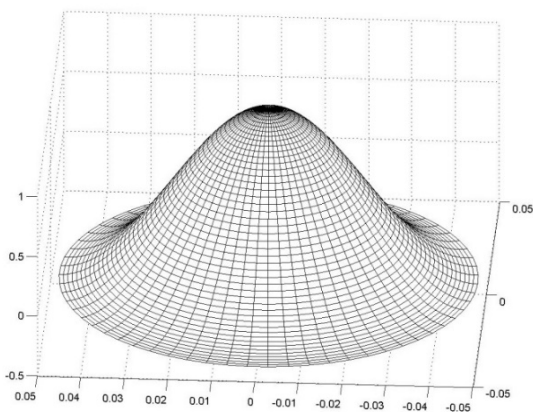
**Метою дослідження** є забезпечення необхідної довговічності технологічного обладнання для фільтрування рідини методом експериментального визначення стійкості різних конструкційних матеріалів до ультразвукового кавітаційного впливу.

## Дослідження

Для проведення експериментальних досліджень кавітаційної стійкості конструкційних матеріалів необхідно було розробити стенд, який би мав можливість змінювати інтенсивність ультразвукових коливань в широких межах. Для цього було запропоновано використати циліндричну кавітаційну камеру (рис. 1),



**Рис. 1.** Моделювання роботи циліндричної кавітаційної камери за умови збудження на радіальній моді коливань



**Рис. 3.** Епіюра звукового тиску в трубчастій камері за умови збудження радіальної моди коливань

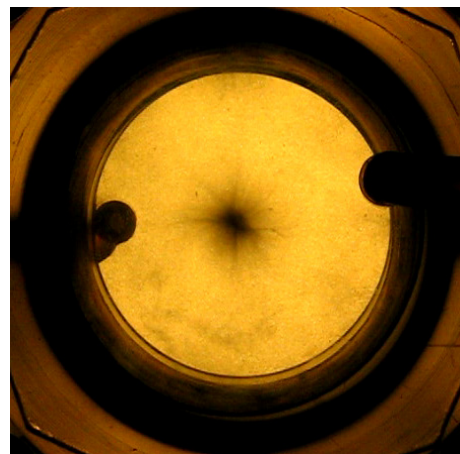
яка збуджується на радіальній моді коливань за допомогою ультразвукових приводів поздовжніх переміщень, які встановлені на зовнішній твірній поверхні трубчастої камери (рис. 2). Внутрішня поверхня випромінювання трубчастого кавітатора забезпечує концентрацію ультразвукової енергії вздовж осі камери (рис. 3), що дозволяє збудити область ультразвукової кавітації в центральній частині камери (рис. 4). Попередньо було виконано планування експерименту.

Для експериментального дослідження за допомогою представленої циліндричної кавітаційної камери було спроектовано та виготовлено спеціальний стенд (рис. 5).

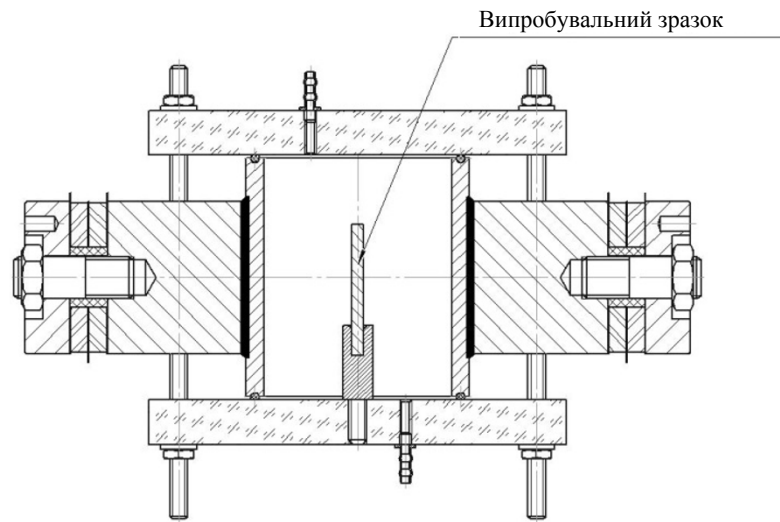
В експериментальній установці інтенсивність ультразвуку можна було регулювати в межах 2...100 Вт/см<sup>2</sup> напругою живлення ультразвукових перетворювачів.



**Рис. 2.** Трубчастий ультразвуковий кавітатор



**Рис. 4.** Візуалізація кавітаційної області в центральній частині камери, яка спостерігається через торцеве скло



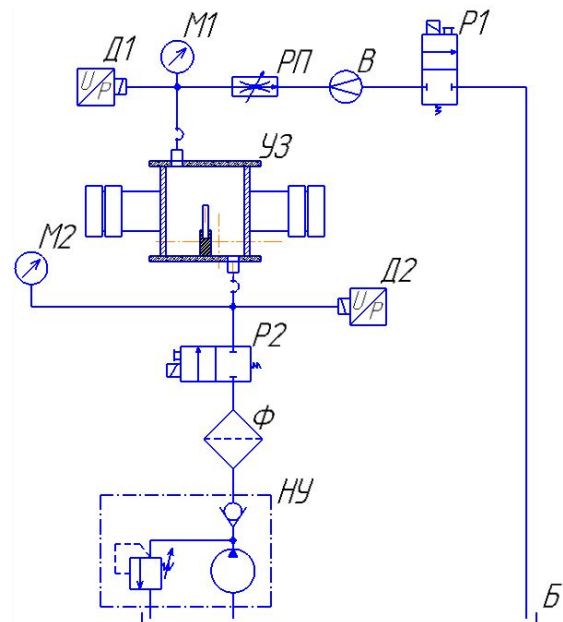
**Рис. 5.** Ультразвукова установка для проведення експериментальних досліджень кавітаційної ерозії конструкційних матеріалів

Для підвищення достовірності результатів за рахунок стабілізації режиму кавітації в камері була створена замкнута система циркуляції робочої рідини, що забезпечило підтримку постійної кількості зародків кавітації (рис. 6). Щоб дослідити вплив ультразвукової кавітації на конструкційні матеріали було обрано декілька різних матеріалів і сплавів, що використовуються у машинобудуванні. При проведенні випробувань було обрано наступні умови: рідина – вода ( $H_2O$ ); температура робочої рідини 293 К; тиск у випробувальній камері становив – 0,2 МПа; час випробування – 0–240 хв; витрата рідини через випробувальну камеру 2 л/хв. У якості параметру оцінки ерозійної стійкості матеріалу, що досліджувався, було обрано кількість винесеного матеріалу у період розвиненої кавітації.

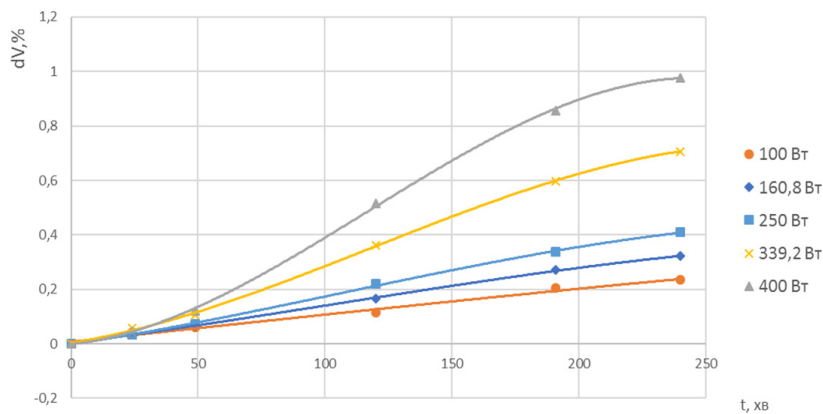
Усі експериментальні зразки конструкційних матеріалів, які зроблені у вигляді стрижнів, встановлювалися у центрі циліндричної ультразвукової камери, де спостерігається максимальна інтенсивність кавітації (рис. 5). Перед кожним випробуванням дослідні зразки ретельно промивалися спиртом та висушувалися у сушильній шафі протягом 30 хв за температури 373 К. Зважування зразків проводилося до і після випробування за допомогою високоточних аналітичних ваг серії AXIS AD50. Ваги 4 класу точності дозволяють визначити вагу випробувального зразку з точністю до 0,001г. Зважування проводилось 5 разів для підвищення точності.

Кожен конструкційний матеріал досліджували за умови зміни споживаної потужності. Так, наприклад, матеріал чавун СЧ20 має лінійну залежність втрати маси від часу до потужності 250 Вт. При по-

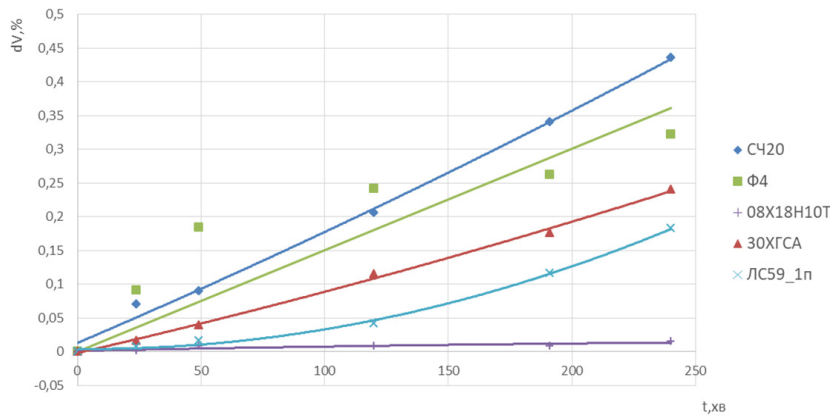
дальшому збільшенні споживаної потужності втрата маси збільшується в рази (рис. 7). Для зменшення кількості вимірювань, було виконано планування експерименту з побудовою регресійної моделі.



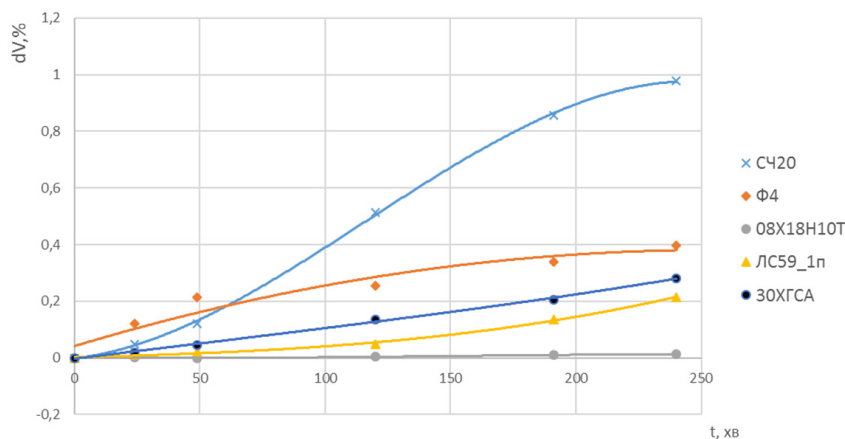
**Рис. 6.** Принципова електрогидравлічна схема експериментального стенду (УЗ – ультразвукова камера, М1, М2 – манометри, Д1, Д2 – датчики, РП – розподільник потоку, В – витратомір, Р1, Р2 – розподільники, Ф – фільтр, НУ – насосна установка, Б – бак )



**Рис. 7.** Залежність втрати маси зразку з чавуну СЧ20 від часу обробки при різних потужностях ультразвукового кавітатора



**Рис. 8.** Залежність втрати маси досліджуваного зразка від часу обробки при споживаній потужності ультразвукового кавітатора 250 Вт



**Рис. 9.** Залежність втрати маси досліджуваного зразка від часу обробки при споживаній потужності ультразвукового кавітатора 400 Вт

Обробивши всі отримані результати, було побудовано ряд графічних залежностей, які дають нам чітку картину стійкості конструкційних матеріалів в кавітаційній камері при різних потужностях (рис. 8 і рис. 9).

Проаналізувавши всі результати слід відмітити, що для забезпечення необхідної довговічності ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання найбільш доцільним буде використання такого конструкційного матеріалу, як 08Х18Н10Т. Оскільки його втрата маси від часу при різних потужностях є найменшою, а, відповідно, і час експлуатації, наприклад, фільтроелементу, виконаного з цього матеріалу, буде більшим, що суттєво впливає на спектр застосування ультразвукової кавітаційної фільтрації в різних технологічних процесах.

## Висновки

Отримані результати дозволяють оцінити кавітаційну стійкість конструкційних матеріалів і виконати обґрунтований вибір матеріалів для застосування в ультразвуковому технологічному обладнанні. Для підвищення довговічності і надійності ультразвукового кавітаційного обладнання необхідно розширити кількість типів випробовуваних матеріалів і збільшити тривалість випробувань, оскільки отримані результати по витраті конструкційних матеріалів під дією кавітації ерозії свідчать, що для окремих, нехай навіть кавітаційно стійких, матеріалів характерним руйнування матеріалу під дією кавітаційної ерозії.

## References

- [1] A.F. Lugovskiy, N.V. Chuhraev, Ul'trazvukovaya kavitacija v sovremennyh tehnologijah [Ultrasonic cavitation in modern technologies], Kiev, Vidavnicno-poligrafichnij centr "Kiivs'kij universitet", 2007. 244 p.
- [2] A. Zilinskiy *et al.*, "Performance increase of ultrasound liquid sprayers", *Mechanics and Advanced Technologies*, no. 2 (80), 2017, pp. 113–122. doi: 10.20535/2521-1943.2017.80.111878
- [3] O.M. Jakhno, K.O. Luhovska and A.V. Movchanuk, "Issledovaniye vozmozhnostey tekhnologii ul'trazvukovoy kavitatsionnoy ochildki elastichnykh poverkhnostey" [Study of the capabilities of the technology of ultrasonic cavitation cleaning of elastic surfaces], *Visnyk NTUU "KPI". Mashynobuduvannia*, no. 58, 2010, pp. 234–240.
- [4] A.A. Kolos, "The ultrasound clearing in freon-compositions", *Visnyk dvyhunobuduvannia*, No. 2, 2014, pp. 192–196.
- [5] R.N. Golyikh *et al.*, *Ultrasound cavitation treatment of viscous and highly dispersible liquid substance*, 2010.
- [6] P.N. Beljanin and Zh.S. Chernenko, *Aviacionnye fil'try i ochistiteli gidravlicheskih system* [Aviation filters and purifiers of hydraulic systems], Moscow, Russia: Mashinostroenie, 1964.
- [7] A.F. Luhovskiy, I.A. Gryshko and A.I. Zilinskiy, "Mathematical model of the filtration process in an ultrasonic field of high intensity", *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Seriya mashynobuduvannia*, No. 74, 2015, pp. 11–17.
- [8] A. Zilinskiy, K. Lugovska and O. Kovalenko, "Features of application of ultrasonic movements in filtering technology of liquid", *Mechanics and Advanced Technologies*, no. 2 (83), 2018, pp. 11–17. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.83.123920>
- [9] I.M. Bernyk, "Intensyfikatsiia protsesu ekstrahuvannia roslynnoi syrovyny z vykorystanniam ultrazvukovoi kavitatsii" [Intensification of the process of extraction of vegetable raw materials using ultrasonic cavitation], *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, Iss. 3, 2017, pp. 69–73.
- [10] L.V. Marchuk *et al.*, "Inactivation of microorganisms in a high-intensity ultrasonic field", *Naukovi pratsi Donets'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Hirnycho-elektromekhanichna*, Vol. 195, No. 22, 2010, pp. 195–206.
- [11] I.M. Fedotkin and I.S. Gulyi, *Kavitatsiia. kavitatsionnaya tekhnika i tekhnologiya, ikh ispol'zovanie v promyshlennosti. Chast' I* [Cavitation. cavitation technique and technology, their use in industry. Part 1], Kyiv, Ukraine: Poligrafkniga, 1997.
- [12] B.A. Agranat *et al.*, *Ul'trazvukovaya tekhnologija* [Ultrasonic technology], Moscow, Russia: Metallurgija, 1974, 503p.
- [13] K. Wegener *et al.*, "Fluid elements in machine tools", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Vol. 66, No. 2. 2017, pp. 611–634. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.008>
- [14] M.M. Glazkov, and P.A. Adzembe, Erosive destructions of details of the hydraulic systems of air courts: Proceedings Conf. Problems of dynamics of the pneumatic and hydraulic and fuel systems of aircrafts. Kujbishev, 1990, pp. 114–133.
- [15] L. Ye *et al.*, Damage characteristics and surface description of near-wall materials subjected to ultrasonic cavitation Ultrasonics Sonochemistry, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105175>
- [16] A.F. Luhovskiy *et al.*, "The impact of static pressure on the intensity of ultrasonic cavitation in aqueous media", *Journal of Water Chemistry and Technology*, vol. 40, no. 3, 2018, pp. 285–299. <https://doi.org/10.3103/S1063455X18030050>

## Экспериментальное исследование устойчивости конструкционных материалов в кавитационной эрозии

О. Ф. Луговской, А. И. Зилинский, А. В. Шульга, А. Д. Лавриненков, И. А. Гришко, И. М. Берник

**Анотация.** В статье рассмотрены проблемы обеспечения долговечности ультразвукового кавитационного технологического оборудования. Представлены результаты планирования эксперимента, которые позволили правильно построить натурное исследование и выбрать конструкционные материалы. Выбраны следующие экспериментальные материалы, как 30ХГСА, СЧ20, Ф4, 08Х18Н10Т и ЛС59 ИП для натурного эксперимента, поскольку все эти конструкционные материалы имеют близкие значения модуля Юнга. Показан ход и проведения натурного экспериментального исследования эрозионного разрушения заявленных конструкционных материалов, из которых могут быть изготовлены ультразвуковые излучатели и детали кавитационных камер. Проанализированы поведение исследуемых образцов и зависимость потери их массы от времени обработки при различных мощностях ультразвукового кавитатора. Исследование позволило определить лучшие материалы с точки зрения кавитационной прочности при наличии усталостных напряжений.

**Ключевые слова:** ультразвуковая кавитация, ультразвуковые колебания, эксперимент, кавитационная прочность материалов, кавитационные камеры, кавитационная эрозия.

## Experimental study of materials resistance to cavitation erosion

A. Luhovskiy, A. Zilinskiy, A. Shulha, A. Lavrinenkov, I. Gryshko, I. Bernyk

**Abstract.** The problems of ensuring the durability of ultrasonic technological equipment is considered in article. The results of the experiment planning are presented, which made it possible to correctly construct a field study and select construction materials. Experimental materials such as 30XGSA, SCH20, F4, 08X18H10T and LSC59 IP were chosen for the field experiment, because all these construction materials have similar values of the Young's modulus. The course and carrying out of full-scale experimental research of erosion destruction of the declared constructional materials from which ultrasonic radiators and details of cavitation chambers can be made are shown. The behavior of the studied samples and the dependence of their weight loss on the processing time at different capacities of the ultrasonic reactor are analyzed. The study identified the best materials in terms of cavitation strength in the presence of fatigue stresses.

**Keywords:** ultrasonic cavitation; ultrasonic vibrations, experiment, cavitation strength of materials, cavitation chambers, cavitation erosion.