

ISSN 2521-1943

# Mechanics

## and Advanced Technologies



Volume 5 • Number 3

2021



National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

# Mechanics and Advanced Technologies

Vol. 5, No. 3, 2021

Founded in 2017

*Editor-in-chief*

**Mukola Bobyr**

(Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic  
Institute, Ukraine)

*Deputy editor-in-chief*

**Oleksandr Lugovskyi**

(Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic  
Institute, Ukraine)

**Georgy Krivov**

(Ukrainian Research Institute of  
Aviation Technology, Ukraine)

*Executive editor*

**Yuriy Danylchenko**

(Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic  
Institute, Ukraine)

The international science-and-technology  
journal "**Mechanics and Advanced Technologies**"  
is the successor to the reader in mechanical engineering  
"**Journal of Mechanical Engineering NTUU "Kyiv  
Polytechnic Institute**"  
(ISSN 2305-9001, e-ISSN 2409-5966). Year of issue 1967-2017

Registration Certificate

KB №22698-12598PP від 04.05.2017р

According to the Ministry of Education and Science of Ukraine  
orders №1643 of December 28, 2019 "Mechanics and  
Advanced Technologies" was included to the List of academic  
editions of Ukraine on technical sciences, category "B"

**Advised is published by the decision:**

*the Scientific Council of Institute of Mechanical Engineering,  
protocol No. 4 of 22 November 2021,  
the Academic Council of the National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",  
protocol No. 10 of 13 January 2021.*

### Editorial Board

Mechanics	Up-to-date machines and the technologies of mechanical engineering	Aviation Systems and Technologies
<p><i>Editors in charge</i>  <b>Holm Altenbach</b>            (IFME, Otto-von-Guericke- University Magdeburg, Germany)</p> <p><i>Editorial Board</i>  <b>Mykhailo Shtern</b>            (Institute of Problems in Materials Sciences NAS of Ukraine, Ukraine)  <b>Yevhen Nykyforovych</b>            (Institute of Hydromechanics NASU, Ukraine)  <b>Vladyslav Golub</b>            (S.P. Timoshenko Institute of Mechanics, Ukraine)  <b>Jaroslav Stryczek</b>            (Politechnika Wroclawska, Poland)  <b>Vadim Silberschmidt</b>            (Loughborough University, Great Britain)  <b>Eugene Olevsky</b>            (San Diego State University, United States)  <b>Valery I. Levitas</b>            (Iowa State University, USA)  <b>Chunliang Zhang</b>            (Guangzhou University, China)</p>	<p><i>Editors in charge</i>  <b>Pavlo Tryvailo</b>            (RMIT University, Melbourne, Australia)</p> <p><i>Editorial Board</i>  <b>Ihor Kryvtun</b>            (Paton Institute of Electric Welding Ukraine)  <b>Oleksii Kachan</b>            (Motor Sich JSC, Zaporozhye, Ukraine)  <b>Rostyslav Iskovyich-Lototskyi</b>            Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine)  <b>Ljubodrag Tanovic</b>            (University of Belgrade, Belgrade)  <b>Mikhael Storchak</b>            (University of Stuttgart, Germany)  <b>Venelin Stojanov Jivkov</b>            (Technical University of Sofia, Bulgaria)  <b>Dmytro Orlov</b>            Lunds Universitet, Lund, Sweden</p>	<p><i>Editors in charge</i>  <b>Jacob Kleiman</b>            (University of Toronto, Canada)</p> <p><i>Editorial Board</i>  <b>Konstantyn Zworykin</b>            (Ukrainian Research Institute of Aviation Technology, Ukraine)  <b>Viacheslav Boguslayev</b>            (JSC "Motor Sich", Ukraine)  <b>Serhii Bychkov</b>            (Antonov State Enterprise, Ukraine)  <b>Piolo Igor</b> (University of Ontario Institute of Technology, Canada)  <b>Josef Kaspar</b> (Aerospace Research and Test Establishment, Czech Republic)  <b>Haeng Muk Cho</b> (Kongju National University, Korea)  <b>Sven Jüttner</b> (IWF, Otto-von-Guericke- University Magdeburg, Germany))  <b>Wei qing Huang</b>            (Guangzhou University, China)</p>

### Composition of the advisory board

**Vitalii Pasichnyk**, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine.  
**Sergiy Shukayev**, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".  
**Oleh Yakhno**, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".  
**Vasyl Strutynskyi**, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".  
**Viktor Maiboroda**, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine.  
**Yurii Kuznietsov**, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine.  
**Yurii Petrakov**, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine.  
**Viacheslav Titov**, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine.  
**Oleh Korostelov**, Luch Design Bureau, Ukraine.  
**Ihor Kravchenko**, SE Ivchenko-Progress, Ukraine.  
**Josef Kaspar**, Aerospace Research and Test Establishment, Czech Republic.

Purpose of edition is to get acquainted with the latest achievements in mechanical engineering, the results of scientific achievements and improved methods of calculation and planning of elements in mechanical engineering constructions. The edition is intended for scientists and scientific and technical specialists in the branch of mechanical engineering.

Articles have been presented in author's version.

The journal publishes only peer-reviewed articles.

The Editorial Board reserves the right to place the authors provided information in different databases.

The collected article is included into general state abstract database "Ukrainika scientific) and international scientometric databases: DAOJ, Index Copernicus, Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), WorldCat, BASE, EBSCO.

### Editorial office

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,  
 building 1, Ave. Peremogy, 37,  
 Kyiv, 03056, Ukraine  
 Tel. (+38 044) 204-95-37  
 E-mail: mmi\_2@ukr.net  
<http://journal.mmi.kpi.ua/>

### Editor

**Iryna Babiienko**

### Desktop publishing

**Victoria Lysenko**



National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

# Mechanics and Advanced Technologies

Vol. 5, No. 3, 2021

Заснований в 2017

*Головний редактор*

**Бобир  
Микола Іванович**  
КПІ ім. Ігоря Сікорського (Україна)

*Заст. головного редактора*

**Кривов  
Георгій Олексійович**  
Український НДІ авіаційних  
технологій (Україна)

**Луговський  
Олександр Федорович**  
КПІ ім. Ігоря Сікорського (Україна)

*Відповідальний секретар*

**Данильченко  
Юрій Михайлович**  
КПІ ім. Ігоря Сікорського (Україна)

Міжнародний науково-технічний журнал "Mechanics and Advanced Technologies" являється правонаступником збірника "Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія машинобудування" (ISSN 2305-9001, e-ISSN 2409-5966) заснованого в 1964 року.

Свідчення про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
КВ №22698-12598ПР від 04.05.2017р

Входить до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук від 28.12.2019 категорія «Б»

**Розглянуто і рекомендовано до видання**  
на засіданні Вченої ради Механіко-машинобудівного інституту  
(протокол № 10 від 13.12.2021р.)  
та засіданні Вченої ради «КПІ ім. Ігоря Сікорського»  
(протокол № 6 від 29.06.2021р.)

**Склад редакційної колегії**

Механіка	Прогресивна техніка і технології машинобудування	Авіакосмічні системи та технології
<p><i>Відповідальні редактори</i>  <b>Холм Альтенбах</b>            (Отто-фон-Геріке університет Магдебурга, Німеччина)</p> <p><i>Члени редколегії</i>  <b>Штерн Михайло Борисович</b>            (ППМ ім. І.М. Францевича НАНУ, Україна),  <b>Никифорович Євген Іванович</b>            (Інститут гідромеханіки НАНУ, Україна),  <b>Голуб Владислав Петрович</b> (Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАНУ, Україна),  <b>Ярослав Стрічек</b>            (Вроцлавський політехнічний університет, Польща),  <b>Вадим Зілбершмідт</b>            (Університет Лафборо, Великобританія),  <b>Євген Олевський</b>            (Університет штату Сан-Дієго, США),  <b>Валерій Левітас</b>            (Університет штату Айова, США),  <b>Чунліан Чжан</b>            (Гуанчжоу університет, факультет механіки та електротехніки, Китай),</p>	<p><i>Відповідальні редактори</i>  <b>Тривайло Павло Михайлович</b>            (Мельбурнський королівський технологічний університет, Австралія)</p> <p><i>Члени редколегії</i>  <b>Кривцун Ігор Віталійович</b>            (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона, Україна),  <b>Качан Олексій Якович</b>            (Національний університет «Запорізька політехніка», Україна),  <b>Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович</b>            (Вінницький національний технічний університет, Україна),  <b>Любодраг Тановіч</b>            (Белградський університет, Сербія),  <b>Міхаель Сторчак</b>            (Штутгартський університет, Німеччина),  <b>Венелін Стоянов Живков</b>            (Технічний університет Софії, Болгарія),  <b>Дмитро Орлов</b>            (Лундський університет, Лунд, Швеція)</p>	<p><i>Відповідальні редактори</i>  <b>Якоб Клеймен</b>            (Університет Торонто, Канада)</p> <p><i>Члени редколегії</i>  <b>Зворикін Константин Олегович</b>            (Український НДІ авіаційних технологій, Україна),  <b>Богуслав В'ячеслав Олександрович</b>            (ВАТ «Мотор Січ», Україна),  <b>Бичков Сергій Андрійович</b> (ДП «АНТОНОВ», Україна),  <b>Піоро Ігор Леонардович</b> (Університет Онтаріо Інститут Технологія, Канада),  <b>Хаенг Мук Чо</b> (Конджукский національний університет, Корея),  <b>Ютгнер Свен</b> (Університет ім. Отто фон Геріке, Німеччина),  <b>Вейцун Хуан</b>            (Гуанчжоу університет, Китай)</p>

**Склад консультативної ради**

**Тітов В'ячеслав Андрійович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Пасічник Віталій Анатолійович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Шукаєв Сергій Миколайович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Петраков Юрій Володимирович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Яхно Олег Михайлович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Стругинський Василь Борисович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Майборода Віктор Станіславович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Кузнецов Юрій Миколайович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Венелін Стоянов Живков** (Технічний університет Софії, Болгарія)  
**Коростельов Олег Петрович** (Державне Київське конструкторське бюро «Луч», Україна)  
**Кравченко Ігор Федорович** (ДП «Івченко-Прогрес», Україна)  
**Йозеф Каспар** (Чеський аерокосмічний дослідний центр, Чеська Республіка)

Журнал присвячено науково-практичним проблемам механіки деформівного твердого тіла, динаміки та міцності машин, біомеханіки, процесів обробки тиском, прикладної гідроаеромеханіки і промислової гідравліки, вдосконалення методів розрахунку і проектування елементів машинобудівних конструкцій, автоматизації та роботизації машинобудування, розробки і впровадження прогресивних технологій та машин механічної і фізико-технічної обробки матеріалів, а також зварювання.

За достовірність інформації несуть відповідальність автори.

Кожна стаття проходить подвійне сліпе рецензування.

Редакційна колегія залишає за собою право розміщувати надані авторами статті в різних інформаційних базах.

Міжнародний науково-технічний журнал «Mechanics and Advanced Technologies» включений у загальнодержавну реферативну базу даних «Україніка наукова» та міжнародні бази даних: Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), DAOJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, EBSCO.

**Адреса редакції**

КПІ ім. Ігоря Сікорського  
 просп. Перемоги, 37,  
 Київ, 03056, Україна  
 Тел. (+38 044) 204-95-37  
 E-mail: mmi\_2@ukr.net

<http://journal.mmi.kpi.ua/>

**Редактор**

**Ірина Бабієнко**

**Комп'ютерна верстка**

**Вікторія Лисенко**

---

## CONTENTS

---

<b>S. Kryvova, A. Rudko, O. Zubanyov, S. Trubachev</b> The methodology of aggregative evaluation of aircraft cooperative production project efficiency .....	275
<b>A. Salenko, I. Derevianko, O. Samusenko, K. Avramov, O. Lithot, V. Rogulin</b> Creation of Sealed Strong Structures of Rocket and Space Equipment FDM Printing Methods by ULTEM™ 9085 PEI Plastic.....	282
<b>J. Kleiman</b> Reducing the Specular Properties of Metalized Teflon Coverings on Canadian Mobile Servicing Station on the International Space Station .....	294
<b>O. Liudvichenko, O. Anisin, O. Lyeshchuk, V. Shchydlovskyi</b> Finite element analysis of electroresistive heating of a high pressure apparatus for studying the solubility of GaN in Fe.....	302
<b>M. Shykhaliyev, V. Medvedev</b> Modeling of the frequency response function and its evaluation during boring .....	307
<b>I. Aftanaziv, L. Shevchuk, O. Strohan, L. Strutynska</b> Increasing the durability of the gun barrels by strengthening the PPD of their inner .....	314
<b>A. Grabowsky, O. Bondarets, I. Babiienko</b> Kinetics of Damage of Materials under Various Regimes of Re-Changeable Loads .....	325
<b>M. Bobyr, Q. Pham, O. Timoshenko</b> Influence of the scheme of laying reinforced composite material on the limit value of damage.....	332
<b>V. Kaliuzhnyi, O. Yarmolenko, K. Marchuk</b> Innovative Technology for Stamping a Small-Sized Sleeve Blank .....	339
<b>I. Bernyk, I. Nazarenko, O. Luhovskyi</b> Investigation of the impedance of liquid-dispersed environment in the conditions of ultrasonic cavitation treatment.....	351
<b>M. Orlyuk, V. Pimanov, V. Zhukov</b> Cold stamping of a cartridge case blank for 40x53 mm caliber grenade launcher ammunition .....	359
<b>I. Nochnichenko, O. Jakhno</b> Energy analysis of transfer processes and their main characteristics in thermo mechanical damping systems .....	366
<b>O. Klochko, O. Okhrimenko, M. Shapovalov</b> Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels.....	374
<b>O. Kholiavik, A. Nogovitsyn, A. Kravchuk, A. Samoylenko, R. Boris</b> Rheological characteristics of steel in continuous roll casting-rolling.....	381
<b>I. Kravchenko, E. Kondratyuk</b> Ivchenko-Progress Se State and Prospects of its Development .....	388

---

---

## ЗМІСТ

---

<b>S. Kryvova, A. Rudko, O. Zubanyov, S. Trubachev</b> The methodology of aggregative evaluation of aircraft cooperative production project efficiency. ....	275
<b>A. Salenko, I. Derevianko, O. Samusenko, K. Avramov, O. Lithot, V. Rogulin</b> Creation of Sealed Strong Structures of Rocket and Space Equipment FDM Printing Methods by ULTEM™ 9085 PEI Plastic.....	282
<b>J. Kleiman</b> Reducing the Specular Properties of Metalized Teflon Coverings on Canadian Mobile Servicing Station on the International Space Station.....	294
<b>О. Людвіченко, О. Анісін, О. Лещук, В. Щидловський</b> Скінченноелементний аналіз електрорезистивного нагрівання апарата високого тиску для дослідження розчинності GaN у Fe .....	302
<b>M. Shykhaliyev, V. Medvedev</b> Modeling of the frequency response function and its evaluation during boring.....	307
<b>I. Афтаназів, Л. Шевчук, О. Строган, Л. Струтинська</b> Підвищення довговічності гарматних стволів зміцненням ППД їх внутрішніх поверхонь .....	314
<b>A. Грабовський, О. Бондарець, І. Бабієнко</b> Кінетика пошкоджуваності матеріалів при різних режимах повторно-змінних навантажень.....	325
<b>M. Бобир, Д. Фам, О. Тимошенко</b> Вплив схеми укладки армованого композитного матеріалу на граничне значення пошкоджуваності.....	332
<b>В. Калюжний, О. Ярмоленко, К. Марчук</b> Іноваційна технологія штампування заготовки гільзи малих розмірів .....	339
<b>I. Берник, І. Назаренко, О. Луговський</b> Дослідження хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки .....	351
<b>M. Орлюк, В. Піманов, В. Жуков</b> Холодне штампування заготовки гільзи гранатометного пострілу калібру 40×53 мм .....	359
<b>I. Ночніченко, О. Яхно</b> Енергетичний аналіз процесів переносу та їх основні характеристики у термомеханічних системах демпфірування .....	366
<b>О. Клочко, О. Охріменко, М. Шаповалов</b> Вихідна інструментальна поверхня модульних пальцевих фрез на базі однополосного гіперболоїда для виготовлення зубчастих евольвентних коліс.....	374
<b>О. Холявік, О. Ноговіцин, О. Кравчук, О. Самойленко, Р. Борис</b> Реологічні характеристики сталі при безперервній валковій розливці-прокачуванні .....	381
<b>I. Кравченко, Е. Кондратюк</b> ДП Івченко-Прогрес стан і перспективи його розвитку .....	388

---

# Дослідження хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки

І.М. Берник<sup>1</sup> • І.І. Назаренко<sup>2</sup> • О.Ф. Луговський<sup>3</sup>

Received: 21 October 2021 / Accepted: 24 November 2021

**Анотація.** В роботі проведено дослідження ефективності використання кавітаційної енергії в технологічних процесах. Встановлено, що ефективність визначається рядом умов, зокрема максимальним використанням енергії від джерела коливань та мінімальним розсіюванням в елементах конструкції, стійкістю параметрів та режимів роботи ультразвукового технологічного обладнання. За їх врахування запропоновано алгоритм побудови математичної моделі для досліджуваних середовищ. Послідовне з'ясування фізичної сутності та механізму процесу технологічної кавітаційної обробки визначають параметри моделі. За врахування такого підходу досліджено особливості розповсюдження ультразвукових хвиль між випромінювачем і відбивачем. Встановлено, що за умов виникнення в технологічному середовищі ультразвукової кавітації відбуваються суттєві зміни її акустичних властивостей. Врахування даних особливостей є принципово важливими за встановлення режимів та параметрів кавітаційної обробки. Вихідною величиною для розрахунків системи “кавітатор – середовище” є опір навантаження технологічного середовища.

**Ключові слова:** кавітація, хвильовий опір, режими, модель, реологічні властивості, акустичні параметри, ефективність обробки.

## Вступ

Ультразвукова кавітаційна обробка рідинно-дисперсних середовищ займає чільне місце в ряду передових і ефективних методів. Реалізується такий метод для низки технологічних процесів, зокрема диспергування, емульгування, гомогенізація, дегазація і інші [1–6]. Кавітація відноситься до вібраційних процесів, які широко застосовується в харчовій [1–3], хімічній [4, 5], машинобудування [6], будівельній [7], та інших галузях промисловості. Загальноприйнятим визначенням кавітації, як фізичного явища, вважається процес утворення порожнин (певного розміру бульбашок) в потоці рідини під дією зовнішнього тиску. Під дією зовнішніх сил в оброблювальному середовищі виникають

хвилі стискування та розтягування, що і реалізують той чи інший технологічний процес обробки технологічного середовища. Процес кавітації обумовлений різкою змінною характеристик поля швидкостей і тисків порожнин рідинного середовища, які і є ключовими параметрами. Зародками можуть бути дрібні бульбашки газу, нерозчинені в рідині, а також незмочуванні тверді частинки. Під дією ультразвукових коливань утворені бульбашки проходять певні стадії свого розвитку та визначаються конкретним значенням амплітуд звукового тиску, який генерується акустичним апаратом [8]. В залежності від рівня інтенсивності ультразвукового випромінювання процес кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ характеризується стадіями зародження, розвиненої кавітації та виродженої. Відсутність кавітації, як і стадія виродженої кавітації, є супутніми. Найбільш важливою є стадія розвиненої кавітації. Вона характеризується утворенням швидкозростаючих парогазових бульбашок, які у фазі стиснення миттєво скорочуються в об'ємі і сплескуються, що і є фінальною частиною процесу ультразвукової кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ. При сплескуванні усередині бульбашки створюються великі тиски до 109 Па, в бульбашці відбуває-

✉ I. M. Bernyk  
iryna\_bernyk@ukr.net

<sup>1</sup> Вінницький національний аграрний університет,  
Вінниця, Україна

<sup>2</sup> Київський національний університет будівництва і  
архітектури, Київ, Україна

<sup>3</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна



ться розігрів парогазової суміші до 8000...12000 К [9]. Коливання бульбашки характеризуються високою радіальною швидкістю стінок бульбашки [9]. Процес ультразвукової кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ є надто складним і в значній мірі визначається спільною взаємодією кавітаційного апарату і оброблювального середовища і тому визначення цієї взаємодії є однією із ключових проблем дослідження, як задач підвищення ефективності використання кавітаційної енергії в технологічних процесах.

### Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Дослідженню процесів ультразвукової кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ присвячена низка робіт. Основна направленість досліджень полягає у визначенні фізичних та хімічних ефектів в середовищах, що підлягають дії кавітації. Так, в роботі [10] дослідження направлені на встановлення ефектів ультразвуку в водних розчинах, оцінці звуколюмінесценції у водних розчинах. В роботі [11] приведено параметричний огляд сонохімії з точки зору контролю та збільшення сонохімічної активності у водних розчинах. Робота [12] присвячена визначенню хімічних наслідків кавітації. Моделюванню зв'язку кінетики реакції та гідродинаміки в бульбашці, що руйнується, присвячена робота [13]. Отже, основна направленість цитованих робіт полягає у дослідженнях утворення ударних хвиль, теплової енергії, локальну електризацію бульбашок, збудження сонолюмінесценції, утворення вільних радикалів та інші технологічні аспекти кавітаційного процесу утворення та розвитку бульбашок при обробці різних і в тому числі рідинно-дисперсних середовищ. Разом з тим є праці в яких, окрім визначення фізичних та хімічних ефектів в середовищах, розглянуто моделювання кавітаційного процесу, параметри та режими. До таких результатів досліджень варто віднести встановлення порогів кавітації [14], визначення виникаючих тисків у кавітуючих бульбашках [15], розсіювання енергії в кавітаційній області [16], моделювання та визначення аналітичних залежностей, що враховують в'язкі і в'язкопластичні властивості дисперсних середовищ [17]. Разом з тим, в повному об'ємі не розглядався взаємовплив кавітаційного апарату і технологічного середовища при ультразвуковій кавітаційній обробці рідинно-дисперсних середовищ. Мало уваги приділено законам зміни реологічних властивостей технологічних середовищ в процесі їхньої обробки та необхідності оцінки і врахування цих змін в практичних розрахунках. Такі дослідження потребують узгодження сил акустичного апарату з опором середовища, як реакцію на силову дію апарату. Таким чином, можливою основною проблемою застосування ультразвуку високої інтенсивності є дослідження контактної зони взаємодії системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище» на основі

визначення рівноваги силового тиску апарату і напружень, виникаючих в оточенні бульбашки з розглядом моделі рідини, як системи з розподіленими параметрами. Такий підхід дає можливість розкрити фізичну сутність взаємодії, розробити пропозиції щодо вдосконалення технології та параметрів обробки технологічних середовищ.

### Мета і задачі дослідження

Метою досліджень є визначення хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки.

Для досягнення означеної мети вирішувалися наступні задачі:

- визначення хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки;
- дослідження зміни параметрів аналітичної залежності хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ;
- визначення числових значень режимів та параметрів хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки.

### Виклад основного матеріалу дослідження

#### *Визначення хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки*

Хвильовий опір середовища на дію акустичного апарату представляє собою відношення акустичного тиску  $p_a$  до коливальної швидкості  $v$  частинок середовища:

$$Z_a = \pm p_a / v. \quad (1)$$

Акустичний тиск в контактній зоні системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище» на основі визначення рівноваги силового тиску апарату і напружень, виникаючих в оточенні бульбашки з розглядом моделі рідини, як системи з розподіленими параметрами можна визначити за методикою, наведеною в роботі [18].

Так, контактний тиск визначається за формулою:

$$p = v_k \rho c K_{x\sigma}, \quad (2)$$

де  $v_k$  – швидкість коливань контактної зони системи «кавітаційний апарат – технологічне середовище»;  $\rho$  – щільність технологічного середовища;  $c$  – швидкість розповсюдження хвиль технологічного середовища в зоні контакту із акустичним апаратом;  $K_{x\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує хвильовий процес за умови, що модель рідини представлена системою з розподіленими параметрами:

$$K_{x_0} = \sqrt{\frac{[\operatorname{sinkl}ch\beta l]^2 - [\cos klsh\beta l]^2}{(k^2 + \beta^2)[(\cos klch\beta l)^2 + (\operatorname{sinklsh}\beta l)^2]}}, \quad (3)$$

Параметри формули (3)  $k$  і  $\beta$  враховують пружну та в'язку складову рідинно-дисперсного середовища.

Таким чином вираз (2) дає можливість визначити амплітуду ультразвукового тиску в залежності від швидкості коливань контактної зони системи “кавітаційний апарат – технологічне середовище”; в'язкості, товщини шару середовища для різних рідин. В свою чергу швидкість коливань контактної зони залежить від амплітуди коливань акустичного апарату в контактній зоні  $A_k$  та частоти коливань цієї зони  $\omega$ :

$$v_k = A_k \omega$$

Амплітуда звукового тиску пов'язана із інтенсивністю ультразвукових коливань, як ключового параметра кавітаційного процесу, співвідношенням:

$$I = \frac{P^2}{2\rho c} A_k \omega \quad (4)$$

З іншого визначення інтенсивності маємо вираз її зв'язку із амплітудою коливань акустичного апарату та частотою коливань:

$$I = A^2 \omega^2 \quad (5)$$

Важливим параметром є коефіцієнт поглинання енергії, який характеризує зміну питомої енергії  $P_{num}$  та інтенсивності ультразвуку  $I$  в кавітуючому середовищі:

$$a_n = P_{num} / I. \quad (6)$$

Наведені формули та залежності (1)–(6) враховують параметри та характеристики для визначення та оцінки хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки. Таку залежність можна представити в загальному вигляді:

$$F = f\{A, A_i, f, \nu, W, p, l, t, l, p, \sigma, c, E, p, \mu\}, \quad (7)$$

де серед невизначених вище  $p$  позначень:  $F$  – функціонал (інтегральний критерій);  $A_i$  – потокова амплітуда коливань середовища на відстані  $x_i$  від границі контактної зони “акустичний апарат – середовище”;  $f$  – частота коливань акустичного апарату;  $W$  – енергія,  $P$  – потужність;  $t$  – час;  $l$  – характерний розмір середовища у напрямку розповсюдження в ньому акустичної хвилі;  $\sigma$  – напруження в середовищі;  $E$  – модуль пружності середовища;  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості середовища.

**Дослідження зміни параметрів аналітичної залежності хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ**

Зміна амплітуди коливань випромінювача від співвідношення висоти шару до довжини хвилі для різних коефіцієнтів в'язкості приведена на рис. 1 [19].

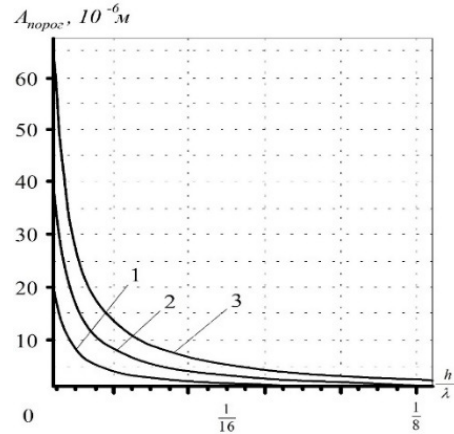


Рис. 1. Зміна амплітуди коливань випромінювача від співвідношення висоти шару до довжини хвилі для різних коефіцієнтів в'язкості: 1 – 1 мПа·с; 2 – 200 мПа·с; 3 – 400 мПа·с

Окрім амплітуди коливань випромінювача на параметри кавітаційної обробки середовища здійснюють істотне значення й інші фактори, зокрема, модуль пружності, швидкість звуку в кавітаційній області, відстань від випромінювача, температура і газовміст рідини, склад і концентрація розчинених домішок. Підтвердженням суттєвої зміни співвідношення хвильового опору в процесі кавітаційної дії на технологічне середовище є графіки (рис. 2) можна знати і в роботах [20, 21].

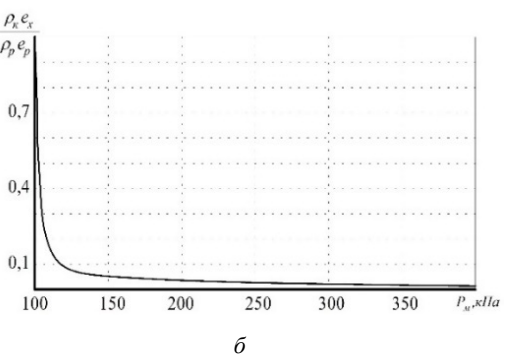
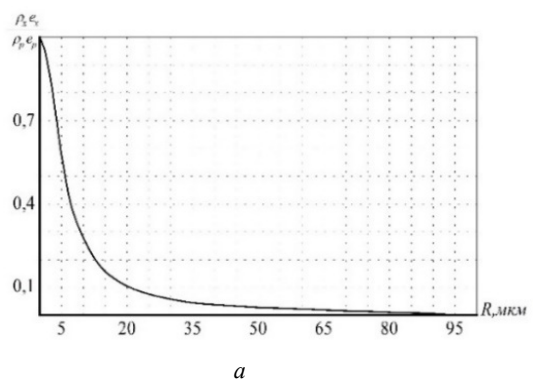
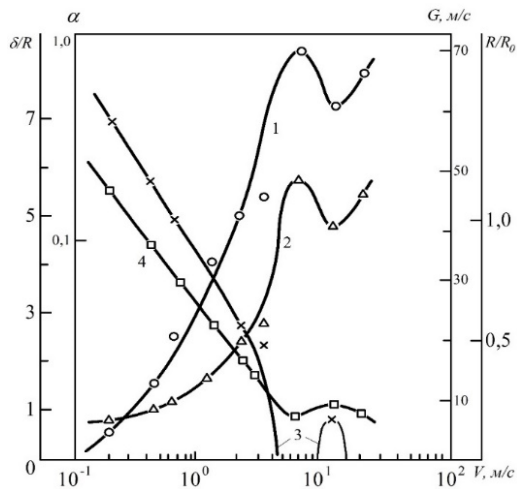


Рис. 2. Залежність зміни хвильового опору: а – від радіусу бульбашки; б – від звукового тиску

На можливість зміни параметрів на стадіях утворення кавітації та її розвитку зазначається і в роботі [22] (рис. 3).



**Рис. 3.** Зміна параметрів кавітаційного процесу: 1 – індекс кавітації; 2 – відносний розмір газових бульбашок  $R/R_0$  в кавітаційній області; 3 – фазова швидкість звуку  $c$  в кавітаційній області; 4 – відносна ширина фронту ударної хвилі  $\delta/R$

В момент виникнення кавітації (див. рис. 3, крива 4) швидкість звуку в середовищі близько випромінювача виявляється в 30 разів менше швидкості звуку в рідині і продовжує падати зі збільшенням інтенсивності випромінювання. В таких умовах початок акустичної кавітації (порог кавітації) можна визначити як утворення гідродинамічної нелінійності середовища, що виражається в переході від малих пульсацій газових бульбашок до пульсацій із сплескуванням, а розвинену кавітацію – як процес періодичного поширення гідродинамічного розриву в вигляді фронту хвилі сплескування газових бульбашок. При значенні  $V$  біля  $4 \text{ м/с}$  відбувається перехід до надзвукових рухів акустичного випромінювача. Саме це явище названо в цитованій вище роботі [22] другим порогом акустичної кавітації. Приблизно в цій же області значень  $V$  ширина фронту хвилі  $\delta$  стає менше діаметру газової бульбашки. При цьому, бульбашка настільки швидко потрапляє із зони зниженого тиску в зону підвищеного тиску, що не встигає захлопнутись. Відбувається руйнування фронту хвилі і виникають розриви на хімічному, диспергуючому і інших технологічних процесах кавітації, що виявлені експериментально в [17].

При подальшому збільшенні  $V$  розмір газових бульбашок в суспензії наближається до резонансного і збудження прогресивної хвилі стиснення стає неможливим. Графічно це відбивається в тому, що фазова швидкість звуку  $c$  спрямовується до нуля. В цей же момент суспензія має найбільший газоміст ( $a \rightarrow 1$ ) і

найбільший розмір газових бульбашок. При значеннях  $V$  біля  $9 \text{ м/с}$  швидкість звуку стає відмінною від нуля і знову формується фронт хвилі сплескування бульбашок. Порушення суцільності рідини під дією зовнішньої сили призводить до утворення нової системи “рідина – бульбашка”. Наявність повітря значно зменшує об’ємний модуль пружності  $E$  і швидкість звуку  $c_k = \sqrt{E/\rho_k}$ . Щільність кавітуючого середовища при цьому зменшується через малу об’ємну концентрацію бульбашок. Падіння швидкості звуку в суспензії газових бульбашок в рідині [23] може призводити до суттєвого зменшення хвильового опору, який визначається наступною залежністю:

$$\rho_k c_k = \rho_0 c_0 \left[ \frac{1}{1 + K \beta_{II} / \beta_0} \right]^{1/2} \quad (8)$$

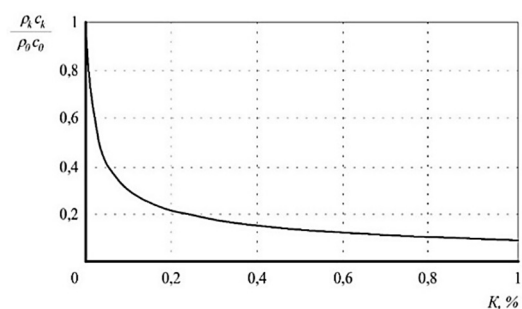
де  $K$  – індекс кавітації,  $\beta_{II} / \beta_0$  – відношення стисливості парогазової суміші в бульбашках до стисливості рідини, для води  $\beta_{II} / \beta_0 \approx 10^4$  [24].

Коефіцієнт індексу кавітації  $K$  дорівнює середній за часом об’ємній концентрації бульбашок:

$$K = \frac{\sum_i V_i}{V_p + \sum_i V_i} \quad (9)$$

де  $V_p$  – об’єм рідини без бульбашок,  $V_i$  – середній об’єм кавітаційної бульбашки,  $i = 1, N$ ,  $N$  – число бульбашок.

Із залежності (6) дійсно випливає факт суттєвого зменшення хвильового опору. Так, залежність хвильового опору середовища від індексу кавітації (рис. 4) засвідчує, що при індексі кавітації всього 0,2% хвильовий опір, а отже і амплітуда діючого на бульбашки звукового тиску зменшується майже в п’ять разів. [25, 26].



**Рис. 4.** Залежність зміни хвильового опору середовища від індексу кавітації

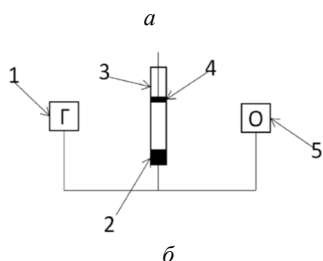
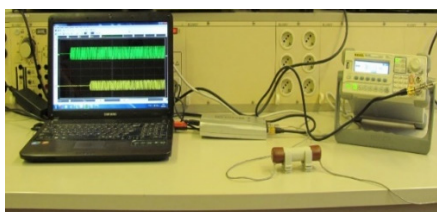
Очевидним є той факт, що будь-який етап процесу кавітації представляє собою взаємодію кавітатора з середовищем із суттєвою зміною основних їхніх характеристик. Таким чином, при виникненні в рідині ультразвукової кавітації, її акустичні властивості істотно змінюються, що потребує зміни режиму і параметрів перенесення енергії від ультразвукового випромінювача в технологічне середовище.

Важливим параметром, який здійснює суттєвий вплив на процес кавітації, є швидкість звуку. Суттєва відмінність між значеннями швидкості розповсюдження звуку, що наведені в різних джерелах, очевидно можливо пояснити різними методиками їх визначення. Іншою причиною такої суттєвої відмінності в числових значеннях швидкостей може бути відсутність фіксації тої частини протікання кавітаційного процесу, в якому визначалася ця швидкість.

Для визначення швидкості розповсюдження хвиль в середовищі була розроблена методика та створено експериментальна установка (рис. 5).

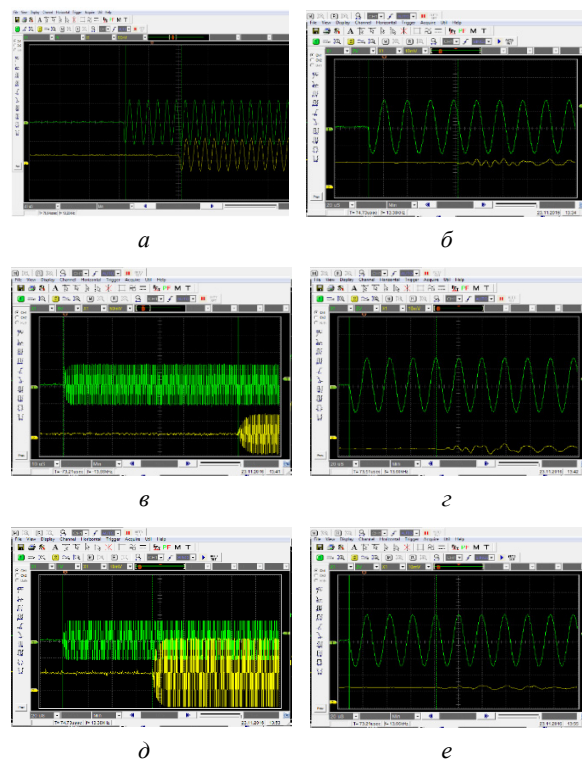
Від генератора імпульсів 1 до випромінювача 2 посилається електричний сигнал фіксованої ультразвукової частоти. Датчик, який в даному випадку є випромінювачем і приймачем, перетворює сигнал в пружні коливання тієї ж частоти (зворотний п'єзо ефект), який проходить через шар технологічного середовища. Приймач перетворює пружні коливання ультразвукової частоти в електричний сигнал тієї ж частоти (прямий п'єзо ефект) і подає сигнал на екран комп'ютера 5. На екрані комп'ютера відображені генераторний імпульс і сигнал, що пройшов через трубку із технологічним середовищем. Відстань між ними  $h$  характеризує час  $t$  проходження пружних коливань від джерела до відбивача і назад. Отже, швидкість розповсюдження хвиль в технологічному середовищі визначалася за формулою:

$$c = h / t \quad (10)$$

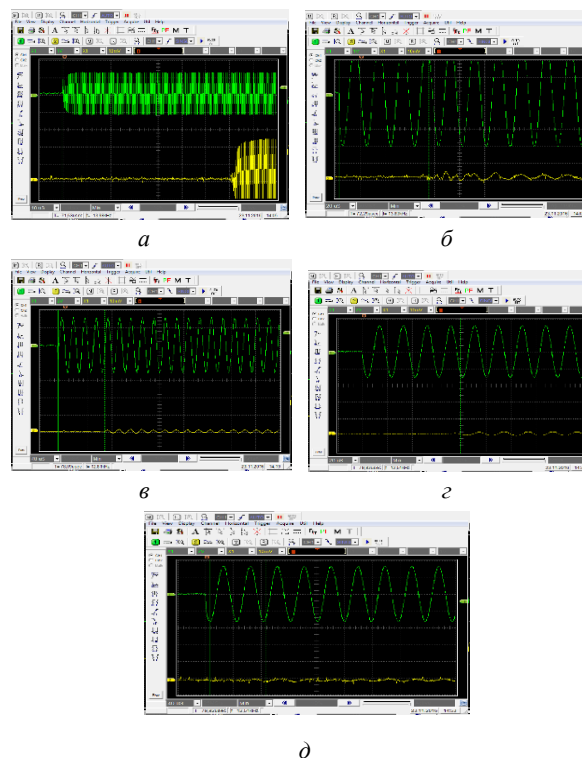


**Рис. 5.** Вимірювання швидкості розповсюдження хвиль в технологічному середовищі: *a* – загальний вигляд; *б* – схема; 1 – генератор імпульсів, 2 – випромінювач; 3 – трубка із технологічним середовищем; 4 – відбивач; 5 – комп'ютер

На рис. 6–7 приведені характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів різних технологічних середовищ, обробкою яких визначено швидкість розповсюдження хвиль.



**Рис. 6.** Характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів технологічних середовищ: вода  $f = 2,58$  МГц – *a*,  $f = 52$  кГц – *б*; молоко  $f = 2,58$  МГц – *в*,  $f = 52$  кГц – *г*; олія соняшникова  $f = 2,58$  МГц – *д*,  $f = 52$  кГц – *е*



**Рис. 7.** Характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів технологічних середовищ: сік томатний з м'якоттю  $f = 2,58$  МГц – *a*,  $f = 52$  кГц – *б*; паста томатна Чумак  $f = 52$  кГц – *в*; майонез 75% жирності  $f = 52$  кГц – *г*; сиркова маса  $f = 52$  кГц – *д*



Отримані результати досліджень засвідчують, що технологічне середовище, безпосередньо взаємодіючи з робочим органом ультразвукової коливальної системи, є її акустичним навантаженням, і зі зміною у часі своїх властивостей є новим джерелом навантаження в будь-який момент зародження, розвитку та сплескування кавітаційних бульбашок і таке середовище прямо впливає на вибір параметрів ультразвукового кавітатора. При цьому вихідною величиною для розрахунків параметрів системи “кавітатор – середовище” являється саме опір навантаження технологічного середовища.

**Рекомендації щодо числових значень режимів та параметрів хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки**

Виконаними дослідженнями визначено, що хвильовий опір рідинно-дисперсних середовищ є основним шляхом інтенсифікації методів акустичної обробки таких середовищ і реалізується шляхом є необхідність не розгляду акустичної системи “кавітатор – технологічне середовище”, як єдину складову всієї системи. На цій основі і запропоновані числові значення режимів і параметрів. Використання визначених конструктивних та технологічних параметри є спроможними реалізувати процес збільшення ступеня концентрації енергії в газових бульбашках з максимальною їх кількістю сплескування в кавітуючому об’ємі технологічного середовища.

В таблиці 1 наведені основні умови виникнення першого та другого порогу кавітації, що враховуються при формуванні алгоритмів і методів режимів і параметрів акустичної дії на технологічні середовища.

**Таблиця 1.** Основні умови виникнення порогу кавітації

Параметри	перший поріг	стадії кавітації	другий поріг
Швидкість коливань, $v$ м/с	$V = 0,1$	$1 < v < 5,0$	$v > 5,0$
Інтенсивність $I$ , Вт/см <sup>2</sup>	$0,1 < I < 10$	$1 < I < 10$	$I > 10$

Вплив в’язкості найбільш сильно проявляється при малих амплітудах акустичного тиску і в першу чергу на бульбашки з невеликими радіусами. В’язкість призводить до того, що бульбашки малого радіусу не сплескуються. В таблиці 2 наведені граничні значення інтенсивності для середовища різної в’язкості.

**Таблиця 2.** Граничні значення інтенсивності для середовища різної в’язкості

В’язкість, $\eta$ , $10^{-3}$ Па	20	40	80	100	150	250	300	400
Інтенсивність, $I_{\min}$ , Вт/см <sup>2</sup>	1,75	2,00	2,45	2,55	3,75	7,50	12,50	16,00
Інтенсивність, $I_{\max}$ , Вт/см <sup>2</sup>	4,35	6,00	7,55	7,75	10,35	17,00	21,55	35,00

Залежність між амплітудою коливань, в’язкістю та максимальним радіусом бульбашки наведено в таблиці 3, а залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску в таблиці 4.

**Таблиця 3.** Залежність між амплітудою коливань, в’язкістю та максимальним радіусом бульбашки

Амплітуда коливань, мкм	4,0	12,0	20,0
В’язкість, $10^{-3}$ Па*с	1,0	30,0	50,0
Максимальний радіус бульбашки, мкм	35,0	48,0	60,0
Поверхневий натяг бульбашки, $10^{-3}$ Н/м	1	72	150

**Таблиця 4.** Залежність максимального радіуса кавітаційних бульбашок від величини звукового тиску

Величина звукового тиску, $10^3$ Па	500	1000	1500	2000	2500	3000
Відношення радіусів бульбашки, $R_{\max}/R_0$	160	270	350	420	460	520

## Висновки

1. Визначено важливість врахування хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ для інтенсифікації процесів ультразвукової кавітаційної обробки. Технологічне середовище, безпосередньо взаємодіючи з робочим органом ультразвукової коливальної системи, є її акустичним навантаженням, і зі зміною у часі своїх властивостей є новим джерелом навантаження в будь-який момент зародження, розвитку та сплескування кавітаційних бульбашок.

2. Визначено та досліджено зміну параметрів аналітичної залежності хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ. Аналітичні залежності (1)–(10) показують на необхідність враховувати в оцінці параметрів хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ умови взаємодії між бульбашками та мати чітке уявлення про ступінь впливу на процес складових тиску, швидкості та співвідношення щільності середовища та бульбашки.

3. Вираз (2) дає можливість визначити амплітуду ультразвукового тиску в залежності від в'язкості і товщини шару середовища для різних рідин. Важливим параметром, що входить в залежність (2) є коефіцієнт, який враховує вплив хвильових процесів, що мають місце в середовищі при її обробці.

4. Приведені числові значення режимів та параметрів хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки. При цьому вихідною величиною для розрахунків параметрів системи “кавітатор – середовище” являється саме опір навантаження технологічного середовища.

## References

- [1] O.F. Luhovskyi, *Aparatne zabezpechennia ultrazvukovykh kavitatsiinykh tekhnolohii*, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021.
- [2] I. Bernyk *et al.*, “Theoretical Investigations of the Interaction of Acoustic Apparatus with Technological Environment Working Process”, *Przeglad Elektrotechniczny*, No. 1(4), pp. 32–37, 2019. <https://doi.org/10.15199/48.2019.04.06>
- [3] I. Gryshko and A. Lugovskoy, “Methods of microorganisms inactivation in the technological liquids”, *Journal of Mechanical Engineering NTUU “Kyiv Polytechnic Institute”*, No. 75, pp. 165-171, 2015,
- [4] I.M. Bernyk, “Intensyfikatsiia tekhnolohichnykh protsesiv obrobky kharchovykh seredovyshch”, *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, No. 3(71), pp. 109–115, 2013.
- [5] T.M. Vitenko, *Hidrodinamichna kavitatsiia u masoobminnykh, khimichnykh i biolohichnykh protsesakh*, Ternopil: Vydavnytstvo TDTU im. I Puliuia, 2009.
- [6] V.N. Hmelev *et al.* *Primenenie ul'trazvuka vysokoj intensivnosti v promyshlennosti*, Bijsk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2010, 203 p.
- [7] Nazarenko I. *et al.*, “Determination of stability of modes and parameters of motion of vibrating machines for technological purpose”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6/7 (108), pp. 71–79, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>
- [8] O.F. Luhovskyi and I.M. Bernyk, “Vstanovlennia osnovnykh parametriv vplyvu tekhnolohichnoho seredovyshcha na robochyi protses ultrazvukovoi kavitatsiinoi obrobky”, *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, No. 3 (75), pp. 121–126, 2014.
- [9] C.E. Brennen, *Cavitation and bubble dynamics*, New York: Oxford University Press, 1995.
- [10] M. Pankaj Ashokkumar, *et al.*, “Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems” Springer. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3887-6>
- [11] Richard James Wood, Judy Lee, Madeleine J. Bussemake “A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions”, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 38, pp. 351–370, September 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.030>
- [12] Kenneth S. Suslick and J. David, “Flannigan Inside a Collapsing Bubble: Sonoluminescence and the Conditions During Cavitation”, *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 59, pp. 659–683. <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.59.032607.093739>
- [13] Sudib K. Mishra *et al.*, “Modeling the coupling of reaction kinetics and hydrodynamics in a collapsing cavity”, *Ultrasonics Sonochemistry*, 17, pp. 258–265, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.05.014>
- [14] I.M. Fedotkin, I.S. Gulyj, *Kavitaciya, kavitacionnaya tekhnika i tekhnologiya, ih ispol'zovanie v promyshlennosti*, Kiev: AO “GLAZ”, 2000.
- [15] M.G. Sirotyuk, L.R. Gavrilov, *Akusticheskaya kavitaciya*, Moscow: Nauka, 2008.
- [16] I.M. Margulis, M.A. Margulis, “Izmereniya akusticheskoy moshchnosti pri issledovanii kavitacionnykh processov”, *Akust. Zhurn.*, T. 1, No. 6. pp. 802-812, 2005.
- [17] G.N. Kuznecov, I.B. SHCHetkin, “Vliyanie vyazkosti na dinamiku zahlopuvayushchej polosti, dvizhushchejsya postupatel'no”, *Akust. Zhurn.*, vol.19, no. 5. pp.727 – 735, 1973.
- [18] I. Bernyk, I. Nazarenko, O. Luhovskyi and A. Svidersky, “Researcher of the influence of low-frequency and high-frequency actions on processing of technological environments”, *EUREKA: Physics and Engineering*, no. 1, pp. 73–86, 2018. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2018.00566>
- [19] I.G. Mihajlov, S.B. Gurevich, “Pogloshchenie ul'trazvukovykh voln v zhidkostyah”, *Uspekhi fizicheskikh nauk*. Vol. XXXV, no. 1, Moskva: Fizicheskij institut im. P.N. Lebedeva RAN, 1948.
- [20] M.A. Promtov, “Perspektivy primeneniya kavitacionnykh tekhnologij dlya intensifikacii himiko-tekhnologicheskikh processov”, *Vestnik Tambovskogo gos.tekh. universiteta*, no. 4. pp. 861 – 869, 2008.
- [21] B.A. Agranat, *Fizicheskie osnovy tekhnologicheskikh processov, protekayushchih v zhidkoj faze s vozdejstviem ul'trazvuka*, Moskva: Mashinostroenie, 1969.
- [22] V.P. Monahov *et al.*, “K voprosu o vtorom poroge ul'trazvukovoj kavitacii v vode”, *Akust. zhurn.*, vol. 21, no. 3, pp. 432–435, 1975.

- [23] S.D. Shestakov, “Mnogopuzyr'kovaya akusticheskaya kavitaciya: matematicheskaya model' i fizicheskoe podobie”, *Tekhnicheskaya akustika*, no. 14, 2010.
- [24] M.G. Syrotyuk, “Kavitacionnaya prochnost' vody”, *Trudy akusticheskogo instituta*, vol. 6, pp. 5–15, 1969.
- [25] A.A. Dojnikov, S.T. Zavtrak, “Uchet szhimaemosti zhidkosti v zadache o vzaimodejstvii gazovyh puzyr'kov v pole zvukovoj voln”, *Akustich. zhurn.*, vol. 34, no. 2, pp. 246–250, 1988. <https://doi.org/10.18832/kp1988039>
- [26] V.A. Akulichev, V.N. Alekseev, K.A. Naugol'nyh, “O dinamike parovyh puzyr'kov v zhidkovodorodnyh ul'trazvukovyh puzyr'kovykh kamerah”, *Akust. zhurn.*, vol. 17, no. 3, pp. 356–354, 1971.

## Investigation of the impedance of liquid-dispersed environment in the conditions of ultrasonic cavitation treatment

I. Bernyk, I. Nazarenko, O. Luhovskyi

**Abstract.** The research of efficiency of use of cavitation energy in technological processes is carried out in the work. It is established that the efficiency is determined by a number of conditions, in particular the maximum use of energy from the source of oscillations and the minimum scattering in the structural elements, the stability of parameters and modes of operation of ultrasonic process equipment. Taking them into account, an algorithm for constructing a mathematical model for the studied environments is proposed. Consistent clarification of the physical nature and mechanism of the process of technological cavitation processing determines the parameters of the model. Taking into account this approach, the peculiarities of the propagation of ultrasonic waves between the emitter and the reflector are investigated. It is established that under the conditions of occurrence of ultrasonic cavitation in the technological environment there are significant changes in its acoustic properties. Taking into account these features is fundamentally important in establishing the modes and parameters of cavitation treatment. The initial value for the calculations of the system “cavitator – environment” is the load resistance of the technological environment.

**Keywords:** cavitation, wave resistance, modes, model, rheological properties, acoustic parameters, processing efficiency.

## Исследование волнового сопротивления жидкостно-дисперсных сред в условиях ультразвуковой кавитационной обработки

И.Н. Берник, И.И. Назаренко, А.Ф. Луговской

**Аннотация.** В работе проведено исследование эффективности использования кавитационной энергии в технологических процессах. Установлено, что эффективность определяется рядом условий, в частности, максимальным использованием энергии от источника колебаний и минимальным рассеянием в элементах конструкции, устойчивостью параметров и режимов работы ультразвукового технологического оборудования. Предложен алгоритм построения математической модели для изучаемых сред. Последовательное уяснение физической сущности и механизма процесса технологической кавитационной обработки определяют параметры модели. Используя такой подход исследованы особенности распространения ультразвуковых волн между излучателем и отражателем. Установлено, что при возникновении в технологической среде ультразвуковой кавитации происходят существенные изменения ее акустических свойств. Учет данных особенностей принципиально важен при установке режимов и параметров кавитационной обработки. Исходной величиной для расчетов системы “кавитатор – среда” является сопротивление нагрузке технологической среды.

**Ключевые слова:** кавитация, волновое сопротивление, режимы, модель, реологические свойства, акустические параметры, эффективность обработки.