

ISSN 2521-1943

# Mechanics

## and Advanced Technologies



Volume 7 • Number 2(98)

2023



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

# Mechanics and Advanced Technologies

Vol. 7, No. 2, 2023

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. 3 of 30 October 2023,*

*the Academic Council of the National Technical University  
of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute".*

*Protocol No. 10 of 6 November 2023.*

## 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 Iskovych-Lototskyi</b>            (Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, 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>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>Weiqing Huang</b>            (Guangzhou University, China)  <b>Josef Kaspar</b>            (Aerospace Research and Test Establishment, Czech Republic)</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.

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: DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), WorldCat, BASE, EBSCO.

## Editorial office

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,  
 building 1, Prospect Beresteyskiy, 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. 7, No. 2, 2023

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 1967 році.

Свідоцтво 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 НН Механіко-машинобудівного інституту (протокол №3 від 30.10.2023 р.), та засіданні Вченої ради "КПІ ім. Ігоря Сікорського" (протокол №10 від 06.11.2023 р.)*

**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>            (ПМ 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>Піоро Ігор Леонардович</b> (Університет Онтаріо Інститут Технологія, Канада),  <b>Хаєнг Мук Чо</b> (Конджукський національний університет, Корея),  <b>Ютгнер Свен</b> (Університет ім. Отто фон Геріке, Німеччина),  <b>Вейцин Хуан</b>            (Гуанчжоу університет, Китай),  <b>Йозеф Каспар</b> (Чеський аерокосмічний дослідний центр, Чеська Республіка).</p>

**Склад консультативної ради**

**Пасічник Віталій Анатолійович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Шукаєв Сергій Миколайович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Яхно Олег Михайлович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Струтинський Василь Борисович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Майборода Віктор Станіславович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Кузнецов Юрій Миколайович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Петраков Юрій Володимирович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Тітов В'ячеслав Андрійович** (КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна)  
**Коростельов Олег Петрович** (Державне Київське конструкторське бюро «Луч», Україна)  
**Кравченко Ігор Федорович** (ДП «Івченко-Прогрес», Україна)

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 розмішувати 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), DOAJ, Index Copernicus, WorldCat, BASE, EBSCO.

**Адреса редакції**

КПІ ім. Ігоря Сікорського  
 просп. Берестейський, 37, кім. 251  
 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>V. Rubashevskiy, S. Shukayev</b> The strength and elastic property of PLA + graphite composites: experimental and theoretical analyses .....	145
<b>M. Kryshchuk, E. Ovcharenko, H. Us</b> Determination of elastic characteristics for a package of monolayers thin-walled plates from composite fibrous materials.....	155
<b>V. Moroz, V. Kochin, V. Semenenko, O. Naumova</b> Formation and development of ventilated supercavity past the disk–cavitator in accelerated motion .....	160
<b>O. Uzunov</b> Detailing the idea of the design process of hydraulic automation objects .....	172
<b>O. Luhovskyi, I. Bernyk, I. Gryshko, T. Zheliaskova, V. Zheliaskov</b> Ultrasound homogenization in the production of dairy products .....	179
<b>G. Avrunin, M. Podrigalo, I. Moroz, O. Koval</b> Analysis of the technical level of hydraulic fluid power with motor-wheels .....	185
<b>E. Ateş</b> Determination of the KIC Fracture Toughness of the X210Cr12 High-Strength Material .....	193
<b>M. Tormakhov</b> Monitoring of the plastic state by changing of a deformation sign .....	200
<b>K. Danylenko, I. Orynyak</b> Method of matched sections in application to thin-walled and Mindlin rectangular plates.....	205
<b>A. Lovska</b> Investigation of the strength of a tank container during road transport .....	216
<b>A. Grabovskiy, O. Bondarets, I. Babiienko</b> Damage of materials under proportional loading .....	223
<b>Y. Petrakov, M. Danylchenko</b> Assignment of the cutting mode when boring holes on CNC machine .....	228
<b>V. Kaliuzhnyi, S. Sytnyk, V. Levchenko</b> Comparative analysis of hot reverse extrusion of hollow products from round and square blanks .....	236
<b>V. Kotlyarov</b> Engineering of heat sources in laser precision machining .....	243
<b>S. Kozlov, V. Vanin</b> Application of the geometric component of a product digital twin when studying its actual geometric parameters .....	257

---

---

## ЗМІСТ

---

<b>В. Рубашевський, С. Шукасв</b> Міцність і пружність PLA + графіт композитів: експериментальний і теоретичний аналіз .....	145
<b>М. Крищук, Є. Овчаренко, Г. Ус</b> Визначення пружних характеристик пакету моношарів тонкостінних пластин з композитних волокнистих матеріалів .....	155
<b>V. Moroz, V. Kochin, V. Semenenko, O. Naumova</b> Formation and development of ventilated supercavity past the disk-cavitator in accelerated motion .....	160
<b>О. Узунов</b> Деталізація уявлення про процес проектування об'єктів гідроавтоматики .....	172
<b>О. Луговський, І. Берник, І. Гришко, Т. Желяскова, В. Желясков</b> Ультразвукова гомогенізація у виробництві молочних продуктів .....	179
<b>Г. Аврунін, М. Подригало, І. Мороз, О. Коваль</b> Аналіз технічного рівня об'ємних гідроприводів з мотор-колесами .....	185
<b>Е. Атеş</b> Determination of the KIC Fracture Toughness of the X210Cr12 High-Strength Material .....	193
<b>М. Тормахов</b> Визначення стану плинності по зміні знаку деформації.....	200
<b>К. Danylenko, I. Ornyuk</b> Method of matched sections in application to thin-walled and Mindlin rectangular plates .....	205
<b>А. Ловська</b> Дослідження міцності контейнера-цистерни при перевезенні автотранспортом.....	216
<b>А. Грабовський, О. Бондарець, І. Бабієнко</b> Пошкоджуваність матеріалів при пропорційному навантаженні .....	223
<b>У. Petrakov, M. Danylchenko</b> Assignment of the cutting mode when boring holes on CNC machine .....	228
<b>В. Калюжний, С. Ситник, В. Левченко</b> Порівняльний аналіз гарячого зворотного видавлювання порожнистих виробів із заготовок круглої і квадратної форми.....	236
<b>В. Котляров</b> Інженерія оптимізації температурних джерел в лазерній прецизійній обробці .....	243
<b>С. Козлов, В. Ванін</b> Застосування геометричної складової цифрового двійника виробу при дослідженні його фактичних геометричних параметрів.....	257

---

# Ультразвукова гомогенізація у виробництві молочних продуктів

О.Ф. Луговський<sup>1</sup> • І.М. Берник<sup>2</sup> • І.А. Гришко<sup>1</sup> • Т.М. Желяскова<sup>1</sup> • В.П. Желясков<sup>1</sup>

Received: 10 May 2023 / Revised: 20 June 2023 / Accepted: 4 September 2023

**Анотація.** В промислових масштабах актуальним є питання продовження терміну придатності та збереження якості молочних продуктів, тому одним з технологічних етапів підготовки молочної сировини є процес гомогенізації, що має велике значення для якості та структури молочних продуктів. Оскільки традиційна гомогенізація – це процес, в якому сировина піддається впливу високого тиску, що призводить до погіршення текстури та втрати корисних речовин, а сам процес є дуже енергоємним, постає питання дослідження альтернативних методів, зокрема, визначення впливу ультразвукової обробки на рівень гомогенізації молока та можливість застосування цього методу у промислових масштабах.

**Мета.** Дослідження ефективності застосування альтернативних методів обробки молочної сировини, які дозволять подовжити термін придатності молока без зниження його якісних властивостей у порівнянні з традиційним методом обробки тиском, шляхом визначення параметрів гомогенізованого молока (частка жирових кульок) за результатами його ультразвукової обробки.

**Методика.** Використано експериментальний метод ультразвукової гомогенізації молока за допомогою установки з ультразвуковим кавітатором.

**Результати.** Досліджено вплив ультразвукової обробки на органолептичні властивості молока та отримано експериментальні результати, що показують ефективність застосування ультразвуку інтенсивністю 20 Вт/см<sup>2</sup> при різних температурах.

**Висновки.** Результатами експерименту підтверджено ефективність використання ультразвуку для гомогенізації молока при виробництві молочних продуктів. Визначено оптимальний температурний режим обробки (від 55 до 70 °С) для досягнення максимального рівня гомогенізації, що значно нижче, ніж температура при традиційній гомогенізації, отже не несе негативного впливу на фізичні та хімічні властивості молочних продуктів.

**Ключові слова:** ультразвук; ультразвукова обробка; гомогенізація; кавітація; нетермічна обробка; термозвук, ультразвуковий перетворювач.

## Вступ

У всьому світі молоко та молочні продукти займають особливо важливе місце у харчуванні людей, їх споживають у достатньо великих кількостях. Отже, в промислових масштабах актуальним є питання продовження терміну придатності та збереження якості молочних продуктів. Виробництво молока – це склад-

ний технологічний процес, який включає в себе ряд важливих етапів для підготовки молока до споживання та переробки. Один із критичних етапів цього процесу – гомогенізація, яка має велике значення для якості та структури молочних продуктів, оскільки призначена для розриву жирних кульок у молоці на менші частинки і рівномірного розподілу їх у рідині. Це покращує структуру молока, збільшує тривалість його зберігання, а також підвищує природний смак молочних продуктів [1, 2].

Традиційна гомогенізація молока – це процес в якому під впливом високого тиску молоко проходить через воронку з малим отвором (гомогенізаційна форсунка). Це створює турбулентні потоки і розриває жирові кульки на менші фрагменти. Але незважаючи на те, що цей метод широко використовується в харчовій

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

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

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



промисловості, традиційна гомогенізація має свої недоліки [3, 4]:

- може змінювати смак і текстуру молока, воно стає менш кремовим і може втрачати частину свого природного смаку;

- втрачається певна кількість корисних речовин, таких як вітаміни, антиоксиданти і фітонутрієнти, оскільки вони можуть розщеплюватися під впливом високого тиску і температури;

- обладнання для традиційної гомогенізації складне і вимагає регулярного обслуговування та очищення форсунок;

- традиційна гомогенізація є енергоємним процесом, оскільки для створення високого тиску використовуються мотори і насоси.

З цієї причини актуальним є дослідження альтернативних технологій гомогенізації, які б уникали несприятливих наслідків традиційної обробки високим тиском, але при цьому забезпечували якість, безпеку та біологічну цінність молока [5, 6].

## Постановка проблеми

З метою дослідження ефективності застосування альтернативних методів обробки молочної сировини, які дозволять подовжити термін придатності молока без зниження його якісних властивостей, у порівнянні з традиційним методом обробки тиском, було обрано технологію ультразвукової обробки з використанням процесу кавітації.

Як показали сучасні дослідження [7, 8], ультразвукова обробка може не тільки зменшити негативний вплив на харчовий продукт, але й забезпечити ефективну інактивацію мікробів, оскільки кавітаційні процеси в рідинах використовуються для знищення або деактивації організмів і ферментів, які сприяють псуванню їжі. Ультразвук не несе негативного впливу на вміст поживних речовин та фізичні характеристики оброблених харчових продуктів [9].

Проблема дослідження полягає в визначенні впливу ультразвукової гомогенізації на фізичні та хімічні властивості молочних продуктів, а також в оцінці її ефективності порівняно з традиційною механічною гомогенізацією. Дослідження має на меті визначити параметри гомогенізованого молока (частка жирових кульок) за результатами його ультразвукової обробки, щоб покращити якість та зберігання молочних продуктів і знайти можливі шляхи зменшення споживання енергії в порівнянні з традиційними методами гомогенізації.

## Аналіз досліджень і публікацій

Багато вітчизняних та зарубіжних вчених, таких як Р. Кнепп, Г. Флінн, Л.Д. Розенберг, О.Д. Пернік, М.О. Рой, О.К. Екнадіосянц, М.Г. Сіротюк, М.А. Приходько, Б.Г. Новицький, Г.С. Кратиш, Б.А. Агранат,

В.І. Башкіров, А. Philipp, W. Lauterborn, O. Lindau, R. Mettin, S. Luther, P. Koch, R. Lang, Shirley C. Tsai, P. Luu, P. Childs, та Chen S. Tsai, досліджували вплив ультразвуку на біотехнологічні процеси харчової промисловості, які відображені у їхніх роботах. Згідно з наведеними публікаціями, автори довели, що у полі ультразвукових хвиль розподіл часточок за розмірами залежить від конкретних акустичних параметрів ультразвукової обробки, таких як частота, питома енергія та тривалість обробки [10].

Численні дослідження продемонстрували ефективне зменшення кількості бактеріальних клітин за використання ультразвуку в поєднанні з термічною обробкою (термозвук) у молоці [10–12]. Застосування ультразвуку (85 Вт/см<sup>2</sup>, 35°C) інактивує бактерії повільніше в цільному та знежиреному молоці порівняно з буфером, що свідчить про те, що різні матриці по різному впливають на зменшення кількості бактерій. Термозвук (60 Вт/см<sup>2</sup>, 50°C) був синергетично більш ефективним, ніж ультразвук сам по собі для інактивації бактерій [10]. Термозвук (63°C впродовж 30 хв) покращив термін придатності незбираного молока [13, 14] шляхом зменшення кількості мезофільних бактерій, демонструючи його потенціал у покращенні якості та безпеки молока. Багато досліджень було зосереджено на зменшенні кількості вегетативних бактерій, які гинуть при пастеризації, тоді як інформації про вплив термозвуку на термо-мезофільні бактерії та зменшення спор у харчових продуктах значно менше.

Високоінтенсивний ультразвук може збільшувати життєздатність пробіотичних штамів, які використовуються у виробництві кисломолочних напоїв та продуктів, та прискорювати гідроліз лактози за рахунок вивільнення ферменту, лактази, і стимулювати вироблення кислоти, що дозволяє скоротити час ферментації. Крім того, ультразвукова обробка може підвищити органолептичні властивості кисломолочних продуктів та їх поживні якості, збільшивши кількість біоактивних пептидів та олігосахаридів, а також знизити вміст лактози [12].

Застосування високоінтенсивного ультразвуку в процесі виробництва молочних продуктів може мати значні переваги, такі як зменшення розміру жирових кульок, покращення в'язкості, зменшення синерезису, збільшення міцності гелю та прискорення ферментації. Оптимальний розмір жирових кульок у молоці може залежати від різних факторів і може бути об'єктом дослідження в галузі харчових наук і молокознавства. Розмір жирових кульок в молоці не є однаковим для всіх видів молока і може коливатися. Зазвичай, розмір жирових кульок у молоці варіюється від декількох сотень нанометрів (нм) до декількох мікрометрів (мкм). Загалом, невеликі жирові кульки (діаметром до 2 мкм) мають перевагу у засвоєнні, оскільки вони мають більшу площу поверхні в порівнянні з великими кульками і, отже, краще доступні для дії ферментів та всмоктування організмом [15].

Проте важливо враховувати, що розмір жирових кульок у молоці це лише один з факторів, які впливають на засвоєння жирів організмом. Склад жирів, їх розподіл у молоці, наявність емульгаторів та інші фактори також можуть впливати на біодоступність жирів у молоці. Використання ультразвуку також може сприяти стабільному утворенню гелю за рахунок денатурації білків молочної сироватки, поділу міцел казеїну та рекомбінації білкової фракції. Це може привести до отримання продукту з більш щільною консистенцією [15].

Під час ультразвукової обробки молока не відбувається руйнування найбільш лабільної частини вітаміну С і його вміст залишається практично незмінний [8]. У випадку традиційної термічної обробки (яка супроводжує процес традиційної гомогенізації) відбувається повне руйнування структури вітаміну С [8]. Отже, ультразвукова обробка сприяє збереженню харчових властивостей молочного продукту.

Для ультразвукової обробки харчових рідин використовуються спеціальні ультразвукові апарати, які генерують хвилі високої частоти для обробки продукту. Зазвичай використовуються ультразвукові процесори, які можуть працювати в різних режимах: пакетному або неперервному режимах, з різною потужністю і частотою. Ультразвукові хвилі високої інтенсивності (НІУ) (також відомі як потужний ультразвук; інтенсивність  $>1 \text{ Вт/см}^2$ , частота  $>18 \text{ кГц}$ ) створюють акустичну кавітацію, де мікробульбашки газу ростуть і сплескуються, створюючи локальні гарячі точки та підвищений тиск [8, 16, 17]. Колапс бульбашки призводить до випромінювання ударних хвиль, які пошкоджують стінки бактеріальних клітин і клітинні структурні та функціональні компоненти, такі як ДНК, шляхом внутрішньоклітинної кавітації [16, 17]. Також ультразвук використовується в харчовій промисловості для емульгування та контролю в'язкості харчових продуктів і покращення очищення під час ультрафільтрації та мікрофільтрації [16, 17, 18].

### Основна частина

Ультразвукові гомогенізатори, наприклад гідродинамічний свисток, використовують електромеханічні та гідродинамічні методи для створення ультразвукових коливань у рідинних сумішах під час гомогенізації. Гідродинамічний свисток прокладає потік через зону впливу ультразвукового поля, що генерується потоком, і створює інтенсивні вихори та акустичні коливання. Виходячи із свистка та проходячи через резонатор, потік розривається на струмені, що збільшує інтенсивність коливань. Метод ультразвукової емульгації виявляється дуже ефективним, досягаючи повноти емульгування на рівні 95% [19].

Важливими параметрами ультразвукової гомогенізації рідин, зокрема методом кавітації, є частота та інтенсивність звукових хвиль, а також час обробки та

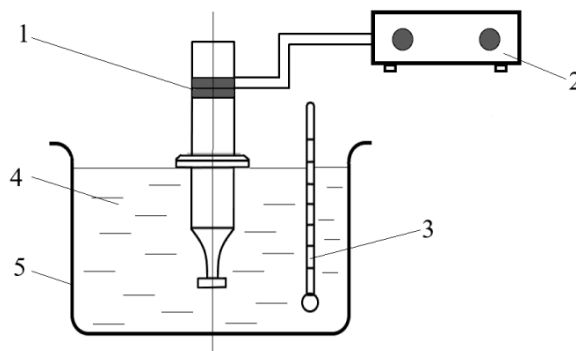
концентрація рідини. У відповідних умовах ультразвукова кавітаційна обробка рідини може бути досить ефективним інструментом для досягнення бажаних результатів. В результаті кавітаційної дії ультразвуку змінюється в'язкість рідини, що може сприяти зниженню опору руху твердих частинок в рідині та підвищенню їх переміщення.

Ультразвукова кавітаційна обробка молока здійснюється з використанням спеціальних ультразвукових установок, які створюють високочастотні звукові хвилі для генерації кавітаційних явищ у рідині. В основі цих установок лежать такі компоненти:

- ультразвуковий генератор з можливістю регулювання частоти і потужності, який виробляє електричний високочастотний сигнал;
- перетворювач, який перетворює електричний сигнал в ультразвукові коливання за допомогою зворотного п'єзоелектричного ефекту або магнітострикційного ефекту;
- кавітаційна камера резонансного розміру, виготовлена з кавітаційно стійкого матеріалу, наприклад, нержавіючої сталі або титанового сплаву;
- наявність системи контролю температури, яка перешкоджає перегріву молока при завищеній потужності ультразвукових коливань, що випромінюються в молоко.

### Експериментальне дослідження ультразвукової гомогенізації

Для проведення дослідження було використано дослідну установку (рис. 1) яка включала такі складові: ультразвуковий кавітатор, що містить джерело УЗ енергії – п'єзоелектричний перетворювач, на який від генератора УЗ коливань подається регульована за частотою та потужністю електрична енергія; активна поверхня кавітатора занурюється в ємність яка наповнена молоком. Для контролю температурних умов процесу обробки використовувався реєстратор температури (термометр).



**Рис. 1.** Схема стенда експериментального дослідження: 1 – УЗ кавітатор; 2 – генератор УЗ коливань з регулятором частоти коливань та потужності; 3 – реєстратор температура; 4 – молоко; 5 – складова ємність.

Основними технічними параметрами використаного в дослідженні кавітатора є робоча частота УЗ впливу, яка складала 22 кГц, його потужність, встановлена на рівні 200 Вт, та величина амплітуди коливань, що складала 5–8 мкм.

Програма експерименту складалась з таких етапів:

- Доведення дослідного зразка молока до заданої температури та визначення гомогенних параметрів рідини до процесу УЗ обробки.

- Занурення активної частини гомогенізатора в емність з молоком визначеної температури на заданих параметрах ультразвукового кавітатора впродовж часу обробки.

- Фіксація температури під час та після УЗ обробки рідини та оцінка якісного складу обробленого зразка.

На рис. 2 наведено результати експерименту по обробці 500 мл молока, що проводився за допомогою ультразвуку з інтенсивністю 20 Вт/см<sup>2</sup> впродовж 10 хв за різних температур. Як видно з наведених даних, найбільший ефект гомогенізації мала ультразвукова обробка при температурі 55–70°C (найбільша частка утворення жирових кульок з розміром меншим за 2 мкм складала 80...90%).

Результати проведеного дослідження підтверджують доцільність використання ультразвуку для процесу гомогенізації молока при виробництві молочних продуктів. Як видно з результатів, навіть за невисоких температурах нагріву, порівняно з традиційними методами обробки, досягається максимальний ефект гомогенізації. Також ультразвуковий метод обробки не потребує використання потужного та енергозатратного обладнання для створення високого тиску.

Важливо відзначити, що дослідження проводилося в замкненому, та досить невеликому об'ємі молока (500 мл). З урахуванням того, що такий тип обробки у промисловому виробництві може бути менш

продуктивним, є важливим провести подальше дослідження процесу гомогенізації молока у потоці. Крім того, важливим завданням є вивчення процесу гомогенізації молока у потоці без переднього нагріву.

## Висновки

На основі проведеного дослідження і аналізу результатів можна зробити наступні висновки:

1. Ультразвукова обробка молока з використанням процесу кавітації є ефективним методом гомогенізації молочної сировини. Вона дозволяє підвищити частку жирових кульок з розміром менше 2 мкм до 80–90%.

2. Оптимальна температура для ультразвукової обробки молока знаходиться в діапазоні від 55 до 70°C, що значно нижче ніж температура при традиційній гомогенізації, отже не має негативного впливу на фізичні та хімічні властивості молочних продуктів, а також не призводить до втрати поживних речовин.

3. Ультразвукова гомогенізація може бути більш енергоефективною альтернативою традиційній механічній гомогенізації (для досягнення рівня гомогенізації 90% достатньо використання ультразвуку інтенсивність 20 Вт/см<sup>2</sup>, тривалість 10 хв. без використання енергозатратного обладнання для створення високого тиску та нагріву), що може призвести до зменшення споживання енергії в процесі обробки молока.

Отже, ультразвукова кавітаційна обробка може бути ефективним інструментом для гомогенізації молока у виробництві молочних продуктів, причому цей метод має потенціал для зниження витрат енергії та обладнання. Додаткові дослідження дозволять визначити його повний потенціал та можливість застосування методу у промислових масштабах.

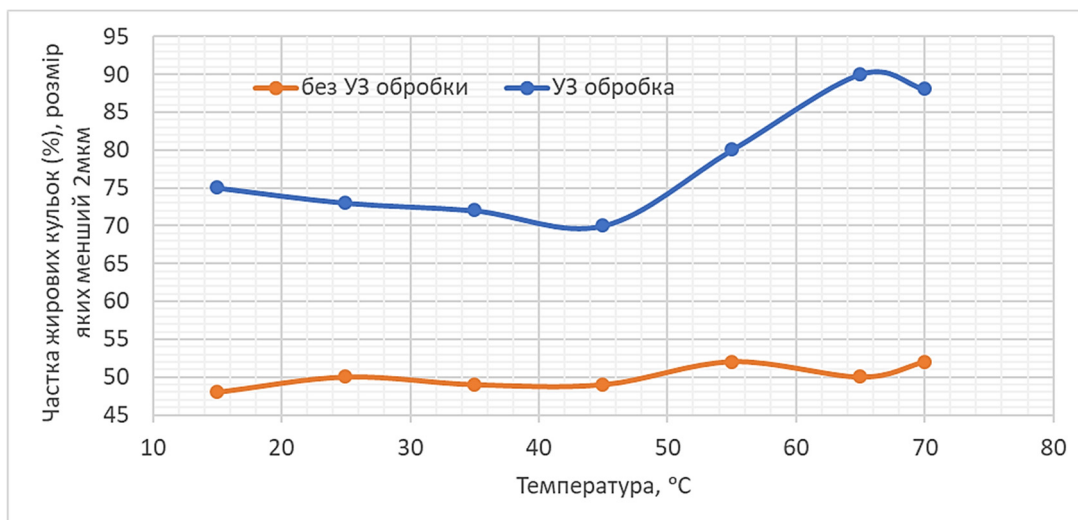


Рис. 2. Експериментальні дані результатів УЗ обробки молока

## References

- [1] G.V. Dejnichenko, K.O. Samoichuk and L.V. Levchenko, “Efektivnist gomogenizacii moloka u pulsacijnomu gomogenizatori,” *Vibracii v tehnicu ta tehnologijah*, No. 1 (84), pp. 116–121, 2017.
- [2] G.V. Dejnichenko, K.O. Samoichuk, A.O. Ivzhenko and L.V. Levchenko, “Analiz konstrukcij gomogenizatoriv molochnoi promislivosti,” *Praci Tavrijskogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universitetu: zb. nauk. prac.*, Melitopol: TDATU, Vol. 16. T.1. pp. 9–15, 2016. DOI: 10.12968/indn.2016.16.15
- [3] K. Ambroziak, K. Kielczewska, D. Mickiewicz and A. Dąbrowska, “Advantages and Disadvantages of Partial High Pressure Homogenisation of Milk in Relation to Full-Stream Homogenisation,” *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 69(3), pp. 279–287, 2019. DOI: 10.31883/pjfn/109987
- [4] G.V. Dejnichenko, K.O. Samoichuk and L.V. Levchenko, “Analitichni doslidzhennja energovitrat pul'sacijnogo gomogenizatora moloka,” *Progresivni tehnika ta tehnologii harchovih virobnihtv restorannogo gospodarstva i torgivli*. Harkiv: HDUHT, Vol. 1 (23). pp. 170–181, 2016.
- [5] Daniela Bermúdez-Aguirre, Maria G. Corradini, Raymond Mawson and Gustavo V. Barbosa-Cánovas, “Modeling the inactivation of *Listeria innocua* in raw whole milk treated under thermo-sonication,” *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 10, Issue 2, pp. 172–178, 2009. ISSN 1466-8564. DOI: 10.1016/j.ifset.2008.11.005
- [6] I. M. Bernik *et al.*, *Innovacijni tehnologii harchovih virobnihtv*, Vinnicja: Vidavec' FOP Kushnir Ju. V., 2022. 300 p. <http://repository.vsau.org/getfile.php/32594.pdf>
- [7] M. Cameron, L.D. McMaster & T.J. Britz, “Impact of ultrasound on dairy spoilage microbes and milk components,” *Dairy Sci. Technol.* 89, pp. 83–98, 2009. DOI: 10.1051/dst/2008037
- [8] O.F. Lugovskij *et al.*, *Aparatne zabezpechennja ul'trazvukovih kavitacijnih tehnologij.*, Vinnicja: FOP Kushnir Ju.V., 2021. 216 p. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/44220>
- [9] T.J. Mason, L. Paniwnyk and J.P. Lorimer, *The uses of ultrasound in food technology*, Ultrason. Sonochem., 3 (1996), 10.1016/S1350-4177(96)00034-X
- [10] D. Bermudez-Aguirre *et al.*, “Composition properties, physicochemical characteristics and shelf life of whole milk after thermal and thermo-sonication treatments,” *Journal of Food Quality*, vol. 32, no. 3, pp. 283–302, 2009. DOI: 10.1111/j.1745-4557.2009.00250.x
- [11] L.M. Krizhak, “Ul'trazvukovi tehnologii u harchovij promislivosti”, *Naukovij visnik Tavrijs'kogo derzhavnogo agrotehnologichnogo universitetu*, Vol. 12, T. 1, 16 p., 2022. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-1-19
- [12] O.S. Jaremchuk and N.V. Novgorods'ka, “Vikoristannja ul'trazvuku u virobnihtvi fermentovanih kislomolochnih produktiv,” *Vibracii v tehnicu ta tehnologijah*, No. 4 (103), pp. 90–98, 2021. <http://socrates.vsau.edu.ua/repository/getfile.php/30629.pdf>
- [13] Som Nath Khanal, Sanjeev Anand and Kasiviswanathan Muthukumarappan, *Megan Huegli, Inactivation of thermophilic aerobic sporeformers in milk by ultrasonication*, Food Control, Vol. 37, pp. 232–239, 2014, ISSN 0956-7135, DOI: 10.1016/j.foodcont.2013.09.022
- [14] Balasubramanian Ganesan *et al.*, “Determining the Effects of High Intensity Ultrasound on the Reduction of Microbes in Milk and Orange Juice Using Response Surface Methodology,” *International Journal of Food Science*, vol. 2015, Article ID 350719, 7 pages, 2015. DOI: 10.1155/2015/350719
- [15] T. Truong *et al.*, *Effect of milk fat globule size on the physical functionality of dairy products*, Cham, Switzerland: Springer, pp. 35–67, 2016.
- [16] A. Thi Hong Bui, D. Cozzolino, B. Zisu, and J. Chandrapala, “Effects of high and low frequency ultrasound on the production of volatile compounds in milk and milk products – a review,” *Journal of Dairy Research*, Vol. 87, No. 4, pp. 501–512, 2020. DOI: 10.1017/S0022029920001107
- [17] J. Chandrapala, C. Oliver, S. Kentish, & M. Ashokkumar, “Ultrasonics in food processing,” *Ultrasonics sonochemistry*, 19(5), pp. 975–983, 2012. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2012.01.010
- [18] O.F. Lugovskij *et al.*, *Ul'trazvukovi kavitacijni tehnologii. Znezarzhennja ta filtruvannja: monografija*, Vinnicja: Vidavec FOP Kushnir Ju.V., 2022. 268 p. [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/47461/1/Ul'trazvukovi\\_kavitatsiini\\_tekhnologii\\_Znezarzhennja\\_filtruvannja.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/47461/1/Ul'trazvukovi_kavitatsiini_tekhnologii_Znezarzhennja_filtruvannja.pdf)
- [19] Sh.B. Zhang, Sh.Y. Zhang and Y.X. Peng, “Comparative study of high-intensity ultrasound and high-pressure homogenization on physicochemical properties of peanut protein-stabilized emulsions and emulsion gels,” *Journal of Food Process Engineering*, 2021. DOI: 10.1111/jfpe.13710
- [20] O.F. Lugovskij, I.A. Grishkoju and A.V. Movchanjuk, “Pristrij dlja kavitacijnoi obrobki ridini,” Pat. 92987 Ukraine, MPK No. a200909283, Dec. 27, 2010.

## Ultrasound homogenization in the production of dairy products

O. Luhovskyi<sup>1</sup>, I. Bernyk<sup>2</sup>, I. Gryshko<sup>1</sup>, T. Zheliaskova<sup>1</sup>, V. Zheliaskov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

**Abstract.** The issue of extending the shelf life and preserving the quality of dairy products is crucial on an industrial scale. Therefore, one of the technological stages in milk preparation is the homogenization process, which significantly affects the quality and structure of dairy products. Traditional homogenization involves subjecting the raw material to high pressure, which can lead to texture deterioration and loss of valuable substances. Additionally, this process is energy-intensive. Hence, there is a need to explore alternative methods, including the impact of ultrasonic treatment on milk homogenization and its feasibility in industrial settings.

**Objective:** This study aims to assess the effectiveness of alternative methods for processing milk that can extend its shelf life without compromising its quality compared to traditional pressure-based processing. This is achieved by evaluating the parameters of homogenized milk (such as the fraction of fat globules) following ultrasonic treatment.

**Methodology:** An experimental approach utilizing ultrasonic homogenization of milk with an ultrasonic cavitation device was employed. Results: The study examined the impact of ultrasonic treatment on the sensory properties of milk and obtained experimental results that demonstrate the effectiveness of ultrasound at an intensity of 20 W/cm<sup>2</sup> at various temperatures.

**Conclusions:** The experiment's results confirm the effectiveness of ultrasound for milk homogenization in the production of dairy products. An optimal temperature range for processing (from 55 to 70°C) was identified to achieve the highest level of homogenization, significantly lower than the temperature used in traditional homogenization. Therefore, this method does not negatively affect the physical and chemical properties of dairy products.

**Keywords:** ultrasound; ultrasound processing; homogenization; cavitation; non-thermal processing; thermosonication; ultrasonic transducer.