

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-51>

УДК 532.528

ВІТЕНЬКО ДМИТРО

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0009-0004-0050-2104>e-mail: dmitrovitenko25@gmail.com**ЗВАРИЧ НАТАЛІЯ**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

<https://orcid.org/0000-0001-5748-5297>e-mail: zvarych_n@tntu.edu.ua

ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОДИНАМІЧНОГО АПАРАТА

У статті виконано оцінку енергоефективності трьох конструкцій гідродинамічних апаратів по типу труби Вентурі за допомогою коефіцієнта η який визначали як відношення об'єму парогазової фази до питомої введеної енергії ($\text{м}^3/\text{кДж}$). Результати підтверджено експериментальними дослідженнями щодо зміни рН води та подрібнення жирової фази молока.

Ключові слова: гідродинаміка, енергоефективність, парова фаза, моделювання, кавітація.

VITENKO DMYTRO**ZVARYCH NATALIA**

Ternopil Ivan Puluj National Technical University

ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT OF A HYDRODYNAMIC APPARATUS

This study evaluated the energy efficiency of three hydrodynamic devices based on the Venturi tube (VT) principle under the same hydrodynamic conditions. Cavitation processes, which are commonly used in industrial applications such as disinfection, emulsification, dispersion, and degassing, were examined. In Venturi-type devices, the formation of the vapor-gas phase occurs when a local pressure drops below the saturation pressure, causing a phase change. However, only part of the supplied energy is used for bubble formation, with the remainder dissipated through turbulence, friction, and heat. Therefore, it was necessary to assess the energy efficiency of different structural designs.

Three configurations were examined: a traditional Venturi tube, a design featuring a helical (screw-type) obstacle, and a design with a conical obstacle. The vapor-gas volumes were calculated using computational fluid dynamics (CFD) simulations, while the energy input was measured experimentally. The specific efficiency was determined as the ratio of vapor volume to the specific energy input. All devices operated at the same inlet pressure of 350,000 Pa. Outlet pressures, flow rates, and velocity profiles were used to compute pressure drops and energy dissipation. The cavitation number was also calculated for each design to assess cavitation intensity.

It was found that the highest efficiency ($1.79 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{J}$) was achieved with the conical obstacle, followed by the screw-type design. The classical configuration exhibited the lowest efficiency ($9.74 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{J}$). Experimental verification involved measuring pH changes in distilled water after 120 seconds of treatment and assessing the homogenization level of milk fat globules using microscopy. The smallest and most uniform fat globule sizes were observed in samples treated with the conical design, confirming enhanced cavitation effects.

Keywords: hydrodynamics, energy efficiency, vapor phase, modelling, cavitation.

Стаття надійшла до редакції / Received 21.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 12.06.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Гідродинамічні ефекти, що виникають в апаратах по типу труби Вентурі (ТВ), широко використовують у технологіях очищення, незараження, емульгування, диспергування тощо. Відомо, що основними факторами впливу на технологічну систему є гідропульсації різних розмірів та колапс парогазових бульбашок, що є джерелом дискретного розподілу енергії в системі. Причому, значна частина введеної енергії може не брати участі у процесі формування парової фази та витратитись на втрати тиску, турбулентність, тепло тощо. У трубах Вентурі процес формування парової фази відбувається за рахунок локального зниження тиску до рівня тиску насиченої пари що призводить до фазового переходу. Ефективність такого процесу значною мірою визначається конструкцією трубки та інших чинників, тому у кожному конкретному випадку потребує оцінки.

Аналіз досліджень та публікацій

Тематиці енергоефективності апаратів за допомогою яких генерують кавітаційні процеси присвячено значна кількість публікацій [1-5]. Представлені підходи базуються на механізмах перетворення енергії. Слід відзначити, що відмінністю гідродинамічних апаратів від акустичних чи оптичних є відсутність проміжних етапів перетворення енергії (механічної в електричну або світлову). Це забезпечує вищу ефективність процесу, що визначається так званим кавітаційним виходом (наприклад, зниження концентрації патогенної мікрофлори, зменшення розмірів жирової фази молока тощо), на одиницю введеної енергії. Чим стабільніше і масштабованіше утворення кавітаційних бульбашок в межах робочої ділянки, тим вище такий вихід. В роботах [6-10] наведено різні підходи до оцінки ефективності, але спільним залишається такий аспект як парогазова фаза, її життєвий цикл та витрати енергії. У гідродинамічних системах з апаратами по типу труби Вентурі витрати енергії обчислюють як добуток об'ємного потоку на перепад тиску, причому основна дисипація енергії

відбувається в межах ділянки довжиною приблизно в вісім діаметрів труби за горловиною де відбувається відновлення тиску.

У статті [10] автори наводять порівняльний аналіз енергоефективності різних типів кавітаційного обладнання — гідродинамічного, акустичного та оптичного. Ця інформація є цінною для розуміння, які апарати є ефективними з точки зору енергоефективності. Відповідно до наведених даних частина енергії, що бере участь безпосередньо у формуванні кавітаційних ефектів для класичної труби Вентурі за умови перепаду тиску ~ 48636 Па становить $\approx 30\%$, а для модифікованих варіантів може досягати $\approx 40\%$. За таких умов співвідношення ефективності до перепаду тиску (Active/ ΔP) перевищує 60% [10-13]. Також слід зазначити, що труби Вентурі забезпечують стабільнішу кавітацію, менші гідравлічні втрати та більшу ділянку кавітації порівняно з діафрагмами [13] за умови введення однакової енергії. Для порівняння енергоефективність акустичної кавітації в низькочастотному діапазоні до 1 МГц становить $45-70\%$ [10], а для високочастотних діапазонів понад 1 МГц ефективність менше 45% . Це обмежує їх застосування у промислових умовах. Для оптичної кавітації, що реалізується за допомогою сфокусованого лазерного випромінювання, показник енергоефективності становить від $0,0004\%$ до $0,1\%$. Це пов'язано з високими витратами енергії на локальний вплив. В зв'язку з цим, оптичну кавітацію використовують переважно в дослідницьких або спеціалізованих лабораторних умовах.

Формулювання цілей статті

Метою роботи було оцінити енергоефективність трьох конструкцій гідродинамічних апаратів, що дозволяють генерувати кавітаційні ефекти за однакових технологічних параметрів та отримати практичну верифікацію отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу

Дослідження проводили для конструкцій апаратів описаних у роботі [14]. Оцінку ефективності здійснювали за відношенням об'єму парогазової фази $V_{\text{прг}}$ до питомої споживаної енергії E_p :

$$\eta = \frac{V_{\text{прг}}}{E_p}.$$

Об'єми парогазової фази визначали за результатами чисельного моделювання [14]. Врахували геометрію труби Вентурі, фізичні параметри робочого середовища та кавітаційні параметри. **Геометричні параметри ТВ становили:** діаметр на вході та виході $D=0,032$ м; діаметр горловини $d=0,01$ м; кут конфузора 45° ; кут дифузора 12° . **Фізичні властивості робочого середовища:** $t=20^\circ\text{C}$; густина $\rho=998$ кг/м³; тиск насиченої пари $P_v \approx 2\,338$ Па. **Тиск на вході для всіх моделей** становив $P_1=350\,000$ Па. **Тиск на виході** (за результатами чисельного моделювання) для базової моделі (ТВ) становив $P_2=48\,994,5$ Па; для конструкції зі шнековою перешкодою - $P_2=44\,882,3$ Па; для конструкції з конусною перешкодою - $P_2=48\,989,2$ Па. Споживану енергію визначали експериментально. У таблиці 1 наведено результати розрахунків.

Таблиця 1

Результати оцінки енергоефективності

Параметр	Труба Вентурі (базова)	Конструкція зі шнековою перешкодою	Конструкція з конусною перешкодою
P_2 , Па	48 994,5	44 882,3	48 989,2
$\Delta P=P_1-P_2$, Па	301 005,5	305 117,7	301 010,8
v_2 , м/с	24,68	24,86	24,68
Q , м ³ /с	0,00194	0,00195	0,00194
Потужність W , Вт	584,3	595,7	584,4
Питома енергія E_p , Дж/м ³	301 185	305 487	301 237
Об'єм парової фази, м ³	$2,93257 \cdot 10^{-6}$	$4,91987 \cdot 10^{-6}$	$5,38547 \cdot 10^{-6}$
Питома ефективність η , м ³ /Дж	$9,74 \cdot 10^{-12}$	$1,61 \cdot 10^{-11}$	$1,79 \cdot 10^{-11}$

Отримані дані засвідчують, що конструктивне удосконалення труби Вентурі (введення шнека або конуса) покращує кавітаційний ефект без суттєвого зростання енергоспоживання. Причому найвищий ефект досягається при використанні конуса, що створює сприятливі умови для формування стійкої та інтенсивної кавітаційної ділянки. Також було розраховано число кавітації σ для режимів зазначених у таблиці 1, яке дозволяє кількісно оцінити ймовірність виникнення кавітаційних явищ. Розрахунок здійснювався за класичною формулою:

$$\sigma = \frac{P_1 - P_2}{0,5 \rho \cdot v_2^2}.$$

Найнижче число кавітації (тобто найвища ймовірність і інтенсивність кавітаційного впливу) спостерігається у конструкції з конусною перешкодою ($\sigma=0,485$). Для конструкції зі шнековою перешкодою $\sigma=0,747$ і для базової конструкції $0,896$.

Практичне підтвердження оцінки інтенсивності здійснювали за зміною рН води з часом, що пов'язане з процесом дегазації й хімічними перетворенням всередині бульбашок та у воді після їх руйнування і за ступенем гомогенізації жирової фази молока, що пов'язане з механічними кавітаційними ефектами. Проведені дослідження дали змогу порівняти роботу моделей та ефективність використання енергії.

Цільне неомогенізоване молоко з вмістом жиру 3,8%, титрованою кислотністю 17–19°Т, однорідної консистенції, білого кольору без осаду, пластівців або стороннього присмаку використовувалося як об'єкт для дослідження кавітаційного впливу на жирову фазу молока. Для оцінки якості гомогенізації молока розмір жирових кульок визначали за допомогою мікроскопа, мікрофотографії та комп'ютерного аналізу отриманих зображень. Дані отримували за допомогою оптичного мікроскопа Micromed XS-2610. Підготовка молочних проб проводилась таким чином: змішування проби; відбір і розчинення проби в дистильованій воді у співвідношенні 1:40 (з кожної проби готували три розчини, з кожного розчину — по два зразки); нанесення на поліроване скло; витримка зразка при кімнатній температурі 20–30 хв; фотографування. Збільшення під час зйомки зображення розміром $10,4 \times 10^{-2}$ м $\times$ $8,0 \times 10^{-2}$ м становило 640 разів (роздільна здатність камери — 640×480 пікселів). На рисунку 1 наведено результати обробки не гомогенізованого молока з використанням трьох різних конструкцій апаратів. Параметри молока до гомогенізації були такими: середній діаметр жирових кульок $d_{\text{mean}} = 2,9 \times 10^{-6}$ м, дисперсія $\sigma^2 = 1,22$, коефіцієнт варіації (ступінь розкиду відносно середнього значення) $V = 69\%$.

У не гомогенізованому молоці спостерігається велика кількість жирових глобул великого розміру. Відповідно до рис.1(а) дисперсна фаза нерівномірна, що є характерним для необробленого молока. Після обробки у контурі з базовою конструкцією апарата впродовж 120 с за відповідних умов ($\sigma=0,4$) спостерігається зменшення в розмірів глобул, які все ще мають значну різницю в діаметрах.

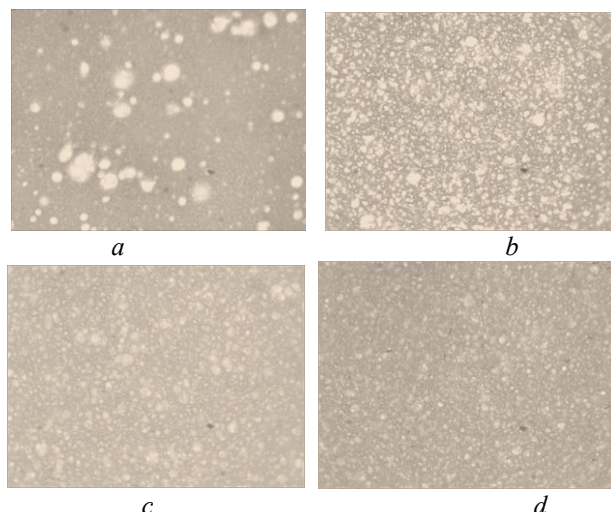


Рис.1. Мікрофотографії зразків молока: *a* – не гомогенізоване молоко; *b* – після обробки у пристрої з базовою конструкцією; *c* – після обробки у конструкції зі шнековою перешкодою; *d* – після обробки у конструкції з конусною перешкодою

Це підтверджує часткову гомогенізацію. Після обробки у контрі з шнековою перешкодою глобули мають менший розмір та варіація яких мала. Це вказує на більший ефект гомогенізації. Найвища ступінь гомогенізації спостерігається під час обробки у контурі з використанням апарата з конусною перешкодою. Жирові глобули мають дрібний розмір після обробки та рівномірно розподілені, що засвідчує ефективну обробку.

Результати зміни рН дистильованої води (проводили за допомогою каліброваного рН-метра шляхом занурення його електрода у зразок води при температурі 20–25 °С) за 120с роботи за однакових вхідних гідродинамічних умов (σ) наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Значення рН води, що відповідають 120с оброблення

Число кавітації σ	Зміна рН води		
	Базова конструкція	Конструкція з конусною перешкодою	Конструкція з шнековою перешкодою
0,9	0,4	0,5	0,6
0,6	0,6	0,75	0,65
0,4	0,7	0,9	0,85

Порівняння цих даних засвідчило, що інтенсивність зміни рН у пристрої з конусною вставкою вище ніж у пристроях з шнеком чи базовій моделі.

Висновки і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Проведені експериментальні та теоретичні дослідження підтвердили, що вдосконалення конструкції гідродинамічного апарата типу труби Вентурі, зокрема введення шнекової або конусної перешкоди, сприяє підвищенню ефективності формування парогазової фази при мінімальному збільшенні енергоспоживання. Найвищий рівень енергоефективності досягається у конструкції з конусною перешкодою, що забезпечує стабільнішу та інтенсивнішу кавітацію та ефективніші енерговитрати. Зміни показників рН води і ступеня гомогенізації жирової фази молока підтвердили зростання кавітаційного впливу у вдосконалених апаратах. Перспективними напрямками подальших досліджень залишаються розширене чисельне моделювання динаміки парогазової фази в різних конфігураціях апаратів, вивчення кавітаційних ефектів у різних робочих середовищах і технологічних процесах, дослідження впливу кавітації на хімічні та біологічні реакції для підвищення продуктивності технологій.

Література

1. Ved, V., Nikolsky, V., Oliynyk, O., & Lipeev, A. (2017). Examining a cavitation heat generator and the control method over the efficiency of its operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8(88)), 22–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108580>
2. Осаул, О. І., Самсоненко, І. М., & Волков, Т. М. (2016). The research of the processes of cavitation energy use for solving heat engineering, ecological and technological problems. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(28)), 26–34. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.66898>
3. Bernyk, I. (2020). Estimation of efficiency of ultrasonic cavitation processing of technological media on energy criteria. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2(89). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.211146>
4. Makarenko, A. (2018). Research of the application efficiency of different constructions of flow cavitation mixers. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(1), 74–81. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.10>
5. Нікольський, В., Олійник, О., Ліпєєв, О., & Вед, В. (2017). Дослідження кавітаційного теплогенератора та методу контролю ефективності його роботи. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 4/8(88), 22–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108580>
6. Chen, Y.-M., & Mongis, J. (2005). Cavitation wear in plain bearing: Case study. *Mécanique & Industries*, 6(3), 195–201. <https://doi.org/10.1051/meca:2005020>
7. Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8(3), 501–551. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(03\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00032-7)
8. Tang, P., Manzano Juárez, J., & Li, H. (2019). Investigation on the effect of structural parameters on cavitation characteristics for the Venturi tube using the CFD method. *Water*, 11(10), Article 2194. <https://doi.org/10.3390/w11102194>
9. Zhou, Z., Li, L., Xuan, X., Sun, X., et al. (2024). Numerical investigation of partial cavitation in a Venturi tube by Eulerian-Lagrangian multiscale modelling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2707(1), Article 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2707/1/012138>
10. Shah, Y. T., Pandit, A. B., & Moholkar, V. S. (1999). Energy efficiency and the economics of the cavitation conversion process. In *Cavitation Reaction Engineering* (Chapter 8). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4787-7>
11. Shankar, V., Lundberg, A., Frenander, K., Ingelsten, S., Landström, L., Pamidi, T., & Johansson, Ö. (2018). Flow induced Venturi cavitation to improve energy efficiency in pulp production. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, 5, 16–25. <https://doi.org/10.11159/jffhmt.2018.002>
12. Pandit, A. B., Mukherjee, A. C., Kasat, G. R., & Mahulkar, A. V. (2011). Method of designing hydrodynamic cavitation reactors for process intensification. *U.S. Patent Application US 2011/0070639 A1*. <https://patents.google.com/patent/US20110070639A1/en>
13. Bimestre, T. A., Mantovani J. A. Júnior, Canettieri, E. V., & Tuna, C. E. (2022). Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: A review of recent developments and future perspectives. *Bioresources and Bioprocessing*, 9, Article 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>
14. Вітенько, Д. О., & Зварич, Н. М. (2025). Гідродинамічні та кавітаційні характеристики статичних моделей апаратів зі змінною конфігурацією вхідного каналу. *Mechanics and Advanced Technologies*, 94(2), 45–54. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.94.2.318233>

References

1. Ved, V., Nikolsky, V., Oliynyk, O., & Lipeev, A. (2017). Examining a cavitation heat generator and the control method over the efficiency of its operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(8(88)), 22–28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108580>
2. Osaul, O. I., Samsonenko, I. M., & Volkov, T. M. (2016). The research of the processes of cavitation energy use for solving heat engineering, ecological and technological problems. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(1(28)), 26–34. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.66898>
3. Bernyk, I. (2020). Estimation of efficiency of ultrasonic cavitation processing of technological media on energy criteria. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2(89). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.89.211146>
4. Makarenko, A. (2018). Research of the application efficiency of different constructions of flow cavitation mixers. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 41(1), 74–81. <https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2019.10>
5. Nikolskyi, V., Oliynyk, O., Lipieiev, O., & Vied, V. (2017). Doslidzhennia kavitatsiinoho teploheneratora ta metodu kontroliu efektyvnosti yoho roboty. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 4/8(88), 22–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108580>
6. Chen, Y.-M., & Mongis, J. (2005). Cavitation wear in plain bearing: Case study. *Mécanique & Industries*, 6(3), 195–201. <https://doi.org/10.1051/meca:2005020>
7. Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2004). A review of imperative technologies for wastewater treatment I: Oxidation technologies at ambient conditions. *Advances in Environmental Research*, 8(3), 501–551. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(03\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(03)00032-7)
8. Tang, P., Manzano Juárez, J., & Li, H. (2019). Investigation on the effect of structural parameters on cavitation characteristics for the Venturi tube using the CFD method. *Water*, 11(10), Article 2194. <https://doi.org/10.3390/w11102194>
9. Zhou, Z., Li, L., Xuan, X., Sun, X., et al. (2024). Numerical investigation of partial cavitation in a Venturi tube by Eulerian-Lagrangian multiscale modelling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2707(1), Article 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2707/1/012138>
10. Shah, Y. T., Pandit, A. B., & Moholkar, V. S. (1999). Energy efficiency and the economics of the cavitation conversion process. In *Cavitation Reaction Engineering* (Chapter 8). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4787-7>
11. Shankar, V., Lundberg, A., Frenander, K., Ingelsten, S., Landström, L., Pamidi, T., & Johansson, Ö. (2018). Flow induced Venturi cavitation to improve energy efficiency in pulp production. *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, 5, 16–25. <https://doi.org/10.11159/jffhmt.2018.002>
12. Pandit, A. B., Mukherjee, A. C., Kasat, G. R., & Mahulkar, A. V. (2011). Method of designing hydrodynamic cavitation reactors for process intensification. U.S. Patent Application US 2011/0070639 A1. <https://patents.google.com/patent/US20110070639A1/en>
13. Bimestre, T. A., Mantovani J. A. Júnior, Canettieri, E. V., & Tuna, C. E. (2022). Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: A review of recent developments and future perspectives. *Bioresources and Bioprocessing*, 9, Article 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>
14. Vitenko, D. O., & Zvarych, N. M. (2025). Hidrodinamichni ta kavitatsiini kharakterystyky statychnykh modelei aparativ zi zminnoi konfigurationsi vkhidnogo kanalu. *Mechanics and Advanced Technologies*, 94(2), 45–54. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.94.2.318233>