

Всеукраїнський науково-технічний журнал  
"ВІБРАЦІЇ В ТЕХНІЦІ ТА ТЕХНОЛОГІЯХ"

ISBN 5-7763-9123

Поштовий індекс 40229

МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ

Свідоцтво про державну реєстрацію № 611 серія КВ від 04.05.1994 р.

Дане періодичне видання включено до переліку наукових видань,  
затверджених ВАК України (Бюлетень ВАК України № 4, 1999 р.)

Номер друкується згідно з рішенням Вченої ради ВДАУ (протокол № 1 від 28 вересня 2006 р.)

**ЗАСНОВНИК** *Вінницький державний аграрний університет*

*Почесний редактор д.т.н., проф. Берник П.С.*

*За сприяння Національної ради України з машинознавства – український комітет IFTOM*

*Інституту проблем міцності НАН України*

*Національної гірничої академії України*

*Дніпропетровського національного університету*

*Вінницького національного технічного університету*

*Національного технічного університету України*

*"Київський політехнічний інститут"*

*Національного університету "Львівська політехніка"*

*Полтавського національного університету ім. Юрія Кондратюка*

*Харківського національного технічного університету сільського*

*господарства ім. Петра Василенка*

*Національного університету харчових технологій*

---

**Національна редакційна колегія**

**Головний редактор**

д.т.н., проф. *Середа Л.П.* (м. Вінниця)

**Заступники головного редактора:**

д.т.н., проф. *Іскович-Лотоцький Р.Д.* (м. Вінниця)

д.т.н., проф. *Паламарчук І.П.* (м. Вінниця)

к.т.н., проф. *Повідайло В.О.* (м. Львів)

д.т.н., проф., чл.-кор. РАЕН *Бабічев А.П.* (м. Ростов-на-Дону, Росія)

Відповідальний секретар – *Кудратова М.В.*

**Члени редакційної колегії:**

д.т.н., проф. *Афтаназів І.С.* (м. Львів)

д.т.н., проф. *Бобир М.І.* (м. Київ)

д.т.н., проф., чл.-кор. УААН *Войтюк Д.Г.* (м. Київ)

д.т.н., проф., чл.-кор. УААН *Гуков Я.С.* (м. Київ)

к.т.н., проф. *Джемелінський В.В.* (м. Київ)

к.т.н., проф. *Дудніков А.А.* (м. Полтава)

к.т.н. доц. *Зав'ялов В.Л.* (м. Київ)

д.т.н., проф., акад. УААН *Зайка П.М.* (м. Харків)

д.т.н., проф. *Зінковський А.П.* (м. Київ)

д.т.н., проф. *Костогрив С.Г.* (м. Хмельницький)

д.т.н., проф. *Кузьо І.В.* (м. Львів)

д.т.н., проф., чл.-кор. УААН *Кушнар'єв А.С.* (м. Мелітополь)

д.т.н., проф. *Ловейкін В.С.* (м. Київ)

д.т.н., проф., чл.-кор. УААН *Мазоренко Д.І.* (м. Харків)

д.т.н., проф., чл.-кор. НАНУ *Матвеев В.В.* (м. Київ)

д.т.н., проф. *Надуть В.П.* (м. Дніпропетровськ)

д.т.н., проф. *Нахайчук О.В.* (м. Вінниця)

д.т.н., проф. *Посвятенко Е.К.* (м. Київ)

д.т.н., проф. *Ройзман В.П.* (м. Хмельницький)

д.т.н., проф. *Седуш В.Я.* (м. Донецьк)

д.т.н., проф. *Сердюк Л.І.* (м. Полтава)

д.т.н., проф. *Сілін Р.І.* (м. Хмельницький)

к.т.н., доц. *Солона О.В.* (м. Вінниця)

д.т.н., проф. *Струтинський В.Б.* (м. Київ)

д.т.н., проф. *Тищенко Л.М.* (м. Харків)

д.т.н., проф. *Шульженко М.Г.* (м. Харків)

д.т.н., проф. *Франчук В.П.* (м. Дніпропетровськ)

к.т.н., доц. *Цуркан О.В.* (м. Вінниця)

д.т.н., проф. *Яковенко В.Б.* (м. Київ)

**Зарубіжні члени редакційної колегії:**

д.т.н., проф., акад. РАН *Блехман І.І.* (м. Санкт-Петербург, Росія)

др. *Бурбуліс А.* (м. Каунас, Литва)

д.т.н., проф. *Копилов Ю.Р.* (м. Воронеж, Росія)

д.т.н., проф. *Лакуста І.Г.* (м. Кишинів, Молдова)

д.т.н., проф. *Серга Г.В.* (м. Краснодар, Росія)

д.т.н., проф. *Субач А.П.* (м. Рига, Латвія)

д.т.н., проф. *Войнаровський Юзеф* (м. Глівіца, Польща)

д.т.н., проф., акад. РАН *Фролов К.В.* (м. Москва, Росія)

д.т.н., проф. *Яцун С.Ф.* (м. Курск, Росія)

---

**Технічний редактор - Кудратова М.В.**

---

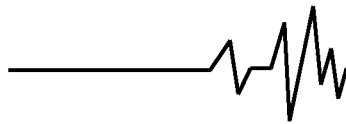
**Адреса** 21008, Вінниця, вул. Сонячна, 3,

**редакції:** ВДАУ, редакція журналу "Вібрації в техніці та технологіях",

тел. (8-0432) 57-44-94, 43-85-20, 43-72-30 (просити 337) факс (8-0432) 46-47-82

e-mail: vibration\_vin@mail.ru

**Банківські реквізити:** Банк УДК у Вінницькій області, ВДАУ МФО 802015, код 00497236,  
р/рах. № 35229011000514, код платника ПДВ 004972302286



Некоз О. І.

Литвиненко О. А.

Національний  
університет  
харчових  
технологій

Kondrat Zdzislaw

Білостоцька  
політехніка,  
Польща

УДК 620.193

## ВИКОРИСТАННЯ КАВІТАЦІЇ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ ТЕПЛОТИ

*В статті показано взаємозв'язок теплового ефекту кавітації з перетворенням енергії при зіткненні з кумулятивними мікроструменями, які утворюються в рідині при замиканні кавітаційних бульбашок.*

*In the article is shown intercommunication of thermal effect of cavitation with energy transformation at a collision with cumulative microcurrents, which are appear in a liquid at shorting of cavitation bubbles.*

**Вступ.** Для нагрівання різноманітних рідин в хімічній, нафтохімічній, харчовій промисловості та комунальному господарстві набувають поширення гідродинамічні теплогенератори, в яких реалізується об'ємне нагрівання рідини. Їх робота ґрунтується на принципі дисипації енергії потоку рідини, зумовленої тертям на поверхнях обтікання та вихроутворенням.

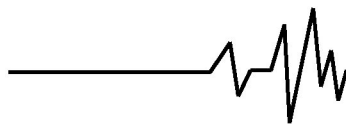
Конструктивно гідродинамічний теплогенератор являє собою вихорову трубу, подібну до вихорової труби Ранка — Хільша, в якій рідина внаслідок тангенціального підведення закручується, і вихоровий потік направляється в її циліндричну частину. На виході з труби обертання потоку гальмується, внаслідок чого відбувається дисипація енергії, чому також сприяє виникнення гідродинамічної кавітації в гальмівному пристрої. При цьому втрата кінетичної енергії рідинного потоку супроводжується його нагріванням.

Останнім часом проводяться роботи з підвищення ефективності гідродинамічних вихорових апаратів кавітаційного типу [1]. Причому, якщо стосовно нагрівання рідини в дисипативних гідродинамічних теплогенераторах роторного типу, в яких дисипація енергії відбувається в зазорі між ротором і статором, відомі ґрунтовні науково-практичні дослідження [2], відомості про роботу кавітаційних теплогенераторів досить суперечливі. Особливо це стосується коефіцієнта корисної дії. В деяких публікаціях навіть стверджується, що цей коефіцієнт може бути більшим за 100%, що виходить за межі розуміння сучасної науки. Водночас відсутня єдина думка щодо сутності фізико-хімічних явищ, які супроводжують

кавітацію, що стримує розвиток кавітаційних технологій і створення досконалих конструкцій апаратів.

В статті наведено результати досліджень теплових ефектів кавітації у взаємозв'язку з проявами інших фізико-механічних явищ.

**Теоретичні передумови.** Незважаючи на понад вікову історію досліджень кавітації, відсутній єдиний підхід щодо механізму її дії та фізичної сутності. Явище кавітації супроводжується мікроударною механічною дією, тепловими, хімічними, електрофізичними явищами. Згідно з рівнянням динамічної поведінки кавітаційної бульбашки Релея в момент її замикання виникає ударна хвиля, яка спричинює ерозійну дію. При колапсі парогазових бульбашок тиск і температура газу досягає значних величин. Проте в багатьох випадках теорія Релея не пояснює явища суттєвого нагрівання рідини при кавітації і виникнення мікроударних зусиль, достатніх для руйнування матеріалів. С.П. Козиревим запропоновано і з використанням швидкісної кінокамери експериментально підтверджено [3] кумулятивно-релаксаційну теорію кавітаційної ерозії, яка ґрунтується на гіпотезах Кука, Корнфельда, Ноде, Елліса про утворення мікроструменів рідини при несферичному замиканні кавітаційної бульбашки. Дослідження довели, що понад 70 % кавітаційних бульбашок замикаються з утворенням кумулятивних мікроструменів [4]. Підтвердженням того, що першопричиною кавітаційної ерозії є безпосередні мікроудари рідини, може бути подібність результатів визначення кавітаційної стійкості матеріалів під дією ультразвукової кавітації, в гідродинамічних трубах, на



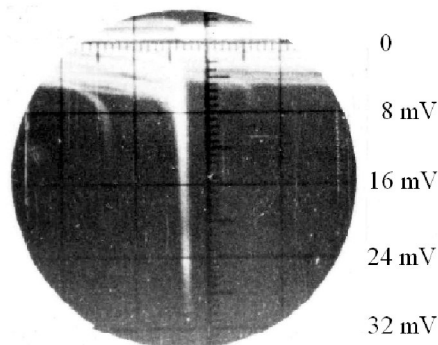
установках з обертовими дисками та на ударно-ерозійних стендах [5]. Саме мікроударною дією цих мікроструменів пояснюється тотожність процесів кавітаційної ерозії і диспергування в проточно-кавітаційних змішувачах [4].

Експериментально доведено [3], що при певних швидкостях удару рідина деякий проміжок часу веде себе подібно твердому тілу. Можна передбачати, що в цей період (так званої релаксації) поведінка рідини визначається законами деформування пружного (а точніше – пружно-пластичного) твердого тіла. Водночас відомо, що при деформуванні енергія деформації перетворюється в теплову енергію, тобто тепловиділення при кавітації може бути обумовлено співудараннями з великою швидкістю кумулятивних мікроструменів рідини, які виникають при замиканні кавітаційних бульбашок.

**Експериментальні дослідження.** Для безпосередньої перевірки перетворення енергії співударів високошвидкісних струменів води з твердою поверхнею в теплову були проведені дослідження на ударно-ерозійному стенді [5], в якому забезпечується періодичний перетин зразків, які обертаються в горизонтальній площині з лінійною швидкістю 66 м/с, струменями води, що витікають з двох сопел діаметром 6,7 мм. Температуру на поверхні зразка в момент співударання зі струменями води вимірювали за допомогою напівштучної термопари залізо–константан. Константановий дріт діаметром 0,2 мм виведено на поверхню зразка, об'єм спаю становив  $2...4 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3$ , що забезпечувало невелику інерційність термопари.

Сигнал термо–е.р.с., що виникав при ударі, через обертовий струмозмінач із срібними контактами надходив на вхід електронного осцилографа, який градуювали за допомогою звукового генератора. Дослідження показали, що в момент зіткнення з струменем води величина термо–е.р.с. становить 27,5...30,0 mV (див. рисунок), що для залізо–константа нової термопари відповідає 550...600 °С. Не виключено, що в мікрооб'ємах менших за розмір термопари, і при більших швидкостях

удару мікроструменів можливі більш високі температури. Їх локальне виникнення може бути обумовлено перетворенням енергії деформації (сталевого зразка і рідини за період релаксації) в теплоту.



Осцилограма термо-е.р.с.

Для дослідження виділення теплоти при кавітації було використано установку з обертовим диском, в якому збудники кавітації виконано у вигляді отворів діаметром 10 і 12 мм. Для вимірювання температури в середині теплоізолюваної ємкості, в якій у воді обертається диск з отворами, встановлено термопари.

Загальна споживана енергія визначалась за показниками електричних вимірювань:

$$E = \sqrt{3}UI\phi\Delta\tau,$$

де  $\Delta\tau$  – час роботи установки.

Згенерована теплова енергія обчислювалась за величиною зростання температури об'єму води:

$$E_u = cm\Delta t,$$

де  $c$  – теплоємність води;

$m$  – маса води в установці;

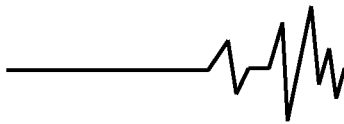
$\Delta t$  – зростання температури.

Коефіцієнт перетворення енергії в теплову визначали за формулою:

$$\eta = \frac{E_u}{E} 100\%.$$

Умови проведення дослідів і одержані результати наведено в таблиці.

№	Умови проведення дослідів				Час проведення дослідів, хв	Приріст температури, °С	Коефіцієнт перетворення енергії, %
	Наявність радіальних перегородок	Діаметр отворів, мм	Колова швидкість, м/с	Ступінь кавітації			
1	немає	10	11	відсутня	40	20	18
2	є	10	11	початкова (вихрова)	40	22	21
3	є	10	22	бульбашкова	22	60	85
4	є	12	22	змішана	16	62	61



**Обговорення результатів досліджень.** Як видно з наведених результатів, проявлення теплового ефекту гідродинамічної кавітації суттєво залежить від умов її виникнення і, як наслідок, від структури кавітаційного поля (див. таблицю).

При відсутності кавітації коефіцієнт перетворення енергії не перевищує 20 %, а тепловий динамічний ефект обумовлений лише дисипацією енергії внаслідок тертя. Початковий ступінь кавітації, який характеризується незначною концентрацією кавітаційних бульбашок, забезпечує незначний приріст температури. Як видно з наведеної таблиці, існує певний ступінь кавітації і, відповідно, структура кавітаційного поля, при якій тепловий ефект найвищий.

Встановлений ефект наявності максимального значення коефіцієнту перетворення енергії в теплову може бути пояснено з позиції запропонованого релаксаційного механізму перетворення енергії деформації при зіткненні мікроструменів рідини. Підтвердженням такого механізму можуть бути дані про кількість кумулятивних мікроструменів залежно від ступеня кавітації, наведені в роботі [4]. При ступені кавітації (довжині кавітаційної каверни  $L=2,5d$ ) спостерігається максимум ерозійної дії та її технологічної активності, що обумовлено найбільшою кількістю утворених при замиканні бульбашок кумулятивних мікроструменів [4]. Отже, можна передбачати, що теплова дія кавітації також пов'язана з виникненням таких мікроструменів. Зменшення коефіцієнту перетворення теплоти при високому ступені кавітації обумовлено меншою кількістю кумулятивних струменів, що

спостерігається при переході до режиму суперкавітації, як показано в роботі [4].

**Висновки.** Безпосередніми вимірюваннями показано проявлення теплового ефекту при ударі рідинного струменя об тверду перепону внаслідок перетворення енергії деформації рідини в теплову. Встановлено наявність максимального значення коефіцієнту перетворення енергії при кавітації в теплову енергію залежно від умов виникнення кавітації, що пов'язано з кількістю утворених при замиканні кавітаційних бульбашок кумулятивних мікроструменів.

### Література

1. Л.П. Фоминский. Как работает вихревой теплогенератор Потапова. – Черкассы: ОКО – Плюс, 2001. – 112с.
2. С.А. Беспалько, О.А. Коваленко, С.П. Поляков. Дослідження дисипативного нагрівання рідини в міждисковому зазорі моделі роторного теплогенератора // Вісник НТУУ – “КПІ”. Машинобудування. – 2007, с. 56-61.
3. С.П. Козырев. Генезис кавитационного изнашивания // Трение и износ. – 1980, т. I, № 5. с. 793-808.
4. О.В. Козюк, А.И. Некоз. Взаимосвязь эрозионной и технологической активностей гидродинамической кавитации // Проблемы трения и изнашивания: Респ. межвед. науч. – техн. сб. – 1990. – Вып. 38. – с. 17-20.
5. Прейс Г.А., Сологуб Н.А., Некоз А.И. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.