

з термодатчиком однозначно визначається виразом (2). Середньомовірна сумарна похибка становить величину порядку 4,5 %.

Експериментальні дослідження були проведені як на реальних деталях – циліндричні напрямні пресів, так і на зразках методом заставних мікротермопар.

**Висновки:**

1. Запропонований круг-термодатчик дає можливість досить точно виміряти температуру шліфування реальної деталі.

2. Застосування круга-термодатчика в принципі дає можливість керувати температурним режимом шліфування безпосередньо в процесі обробки.

Література:

1. Корчак С. Н. Теория обрабатываемости сталей и сплавов при абразивной обработке. Вестник южно-уральского государственного университета. 2003. № 9, Вып. 4. – С. 82-90.

2. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении / Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. – СПб: Политехника. – 2015. – С. 424.

3. Комаров О.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов / Комаров О.С., Ковалевский В.Н., Керженцева Л.Ф. – Минск: Новое знание, 2009. – С. 670.

**Кондратенко М.М., Савельєв С.Г.**

*(КНУ, м. Кривий Ріг)*

**ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У ВОДНОМУ  
СЕРЕДОВИЩІ МЕТОДОМ КАЛОРИМЕТРІЇ**

E-mail: kondratenkom002@knu.edu.ua

Проблема покращення міцнісних та термостійких властивостей сировини для металургійного переділу вирішується з початку промислового виробництва згрудкованих матеріалів. Обробка домішок в шихту огрудкування ультразвуковими хвилями може значно поліпшувати їх властивості [1].

В основу застосування ультразвуку для покращення якості речовини покладено можливість введення всередину матеріалу величезної енергії [2]. Одним із методів, що дозволяє виміряти цю енергію, є калориметрія – сукупність методів вимірювання кількості теплоти, що виділяється або поглинається при протіканні різних фізичних або хімічних процесів [3]. Кількість теплоти  $Q$ , яка передається тілу (системі) або забирається від нього, пропорційна зміні температури тіла  $\Delta t$ , його масі  $m$  і теплоємності  $c$ :

$$Q_i = c \cdot m \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Вимірюючи зміну температури системи, можна розрахувати кількість енергії, що була на це витрачена. А знехтувавши витратами енергії в інших ланках передачі ультразвукових коливань середовищу, можна розрахувати такі параметри ультразвукових хвиль, як їх інтенсивність та амплітуду.

Питомий хвильовий опір в рідких середовищах значно більший, ніж у газів (для води в 3500 разів більше, ніж для газів [4]). Тому за однакових параметрів ультразвукової системи, таких як амплітуда, частота коливань, найбільша акустична потужність випромінюється саме у рідину. Це означає, що ультразвук має найбільш високу ефективність дії у рідинному середовищі. Найбільш економічно доступним серед рідин є водне середовище, яке використовується у більшості технологічних процесів, що потребують присутності рідини. Окрім того, вода не має пожежонебезпечних та вибухонебезпечних властивостей, як, наприклад, спирти, ефіри, гас тощо.

Фактор збільшення температури під дією ультразвукового опромінення не був розглянутий у більшості досліджень, пов'язаних з використанням ультразвуку в рідинах.

Нами виконано досліди з обробки ультразвуковими хвилями двох частот – 20 та 40 кГц – водного середовища, як оптимальнішого для ультразвукової активації бентонітів, що використовують при огрудкуванні металургійної сировини. Досліди проводились у двох резервуарах з генераторами ультразвукових хвиль частотою  $f = 20$  та 40 кГц. Заміри температури виконувались термометром TP101. Окрім таймера, ультразвукові ванни мають вбудовані перемикачі потужності генератора

$P_r$ , що дало змогу вести обробку з кроком в 10 % від максимальної потужності в 150 Вт.

В обох ваннах було проведено по 5 дослідів з ультразвукової обробки 1 л не дистильованої води зі зміною потужності генератора 10, 30, 50, 80 та 100 % від максимальної (150 Вт). Початкова температура води – 24,1 °С. Тривалість обробки в усіх дослідях – 59 хв 59 с. Порівняльні графіки залежності температури від часу обробки надано на рис. 1 (для частоти у/з хвиль 40 кГц) та рис. 2 (для частоти у/з хвиль 20 кГц). На них чітко відстежується збільшення кінцевої температури нагрівання води за один і той самий часовий період зі збільшенням потужності генератора ультразвукових хвиль.

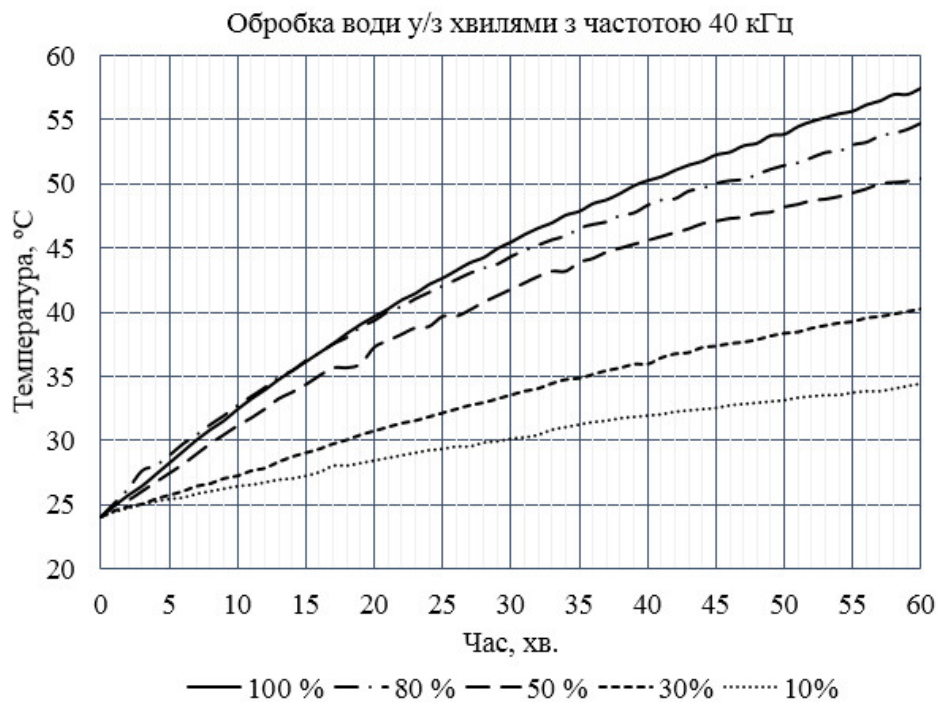


Рис. 1. Графіки залежності температури води від часу обробки при різній потужності ультразвукових хвиль на частоті 40 кГц

Для обчислення кількості енергії, Дж, що була витрачена на нагрівання даної кількості води до отриманої температури в кожному досліді, застосовано формулу (1), де  $c$  – питома теплоємність води, що складає 4187 Дж/(кг·°С);  $m$  – маса води (у всіх дослідях  $m = 1$  кг);  $\Delta t_i^o$  – різниця між найменшою і найбільшою температурою води під час проведення дослідів.

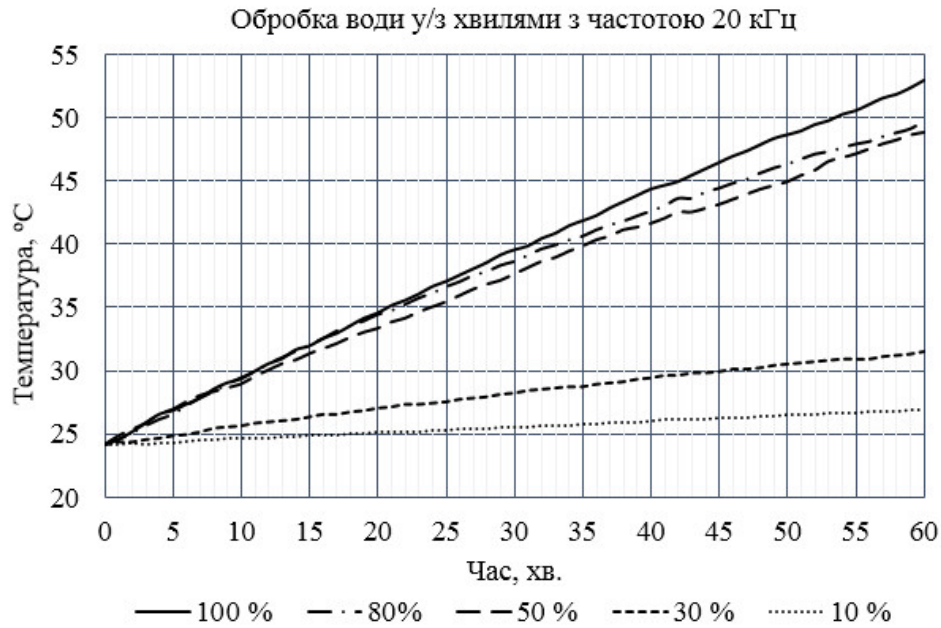


Рис. 2. Графіки залежності температури води від часу обробки при різних потужностях ультразвукових хвиль на частоті 20 кГц

Потужність, що була використана для нагрівання води за час  $\tau_i$ , обчислено за формулою:  $P_i = Q_i / \tau_i$ , Вт. Інтенсивність ультразвукової хвилі  $I$ , Дж/(с·м<sup>2</sup>):  $I = P / S$ , де  $S$  – площа ультразвукової ванни, в дно якої вмонтовані ультразвукові випромінювачі;  $S = 235 \times 110$  мм<sup>2</sup>.

Згідно з [5], інтенсивність гармонічної хвилі, Дж/(м<sup>2</sup>·с), розраховується за формулою  $I = 0,5\rho \cdot a^2 \cdot f^2 \cdot v$ , де  $\rho$  – густина середовища, в якому розповсюджується ультразвукова хвиля, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  – амплітуда цієї хвилі, м;  $f$  – частота хвилі, Гц;  $v$  – швидкість хвилі у даному середовищі; згідно з [6]  $v = 1483$  м/с.

Звідси амплітуда у/з хвиль, м, може бути обрахована за формулою:

$$a = \sqrt{\frac{2I}{\rho f^2 v}}$$

Розрахунки всіх параметрів за наведеними формулами для виконаних дослідів надано в табл. 1 (для частоти 40 кГц) та 2 (для частоти 20 кГц).

Таблиця 1 – Розрахунок параметрів ультразвукових хвиль на частоті 40 кГц

Величини	Позначення	Од. виміру	Розрахунок				
			Потужність генератора	$P_2$	Вт	150	120
		%	100	80	50	30	10
Частота ультразвукових хвиль	$f$	кГц	40				
Густина середовища	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1000				
Максимальна температура	$t_{max}$	°С	57,5	54,8	50,4	40,3	34,5
Початкова температура	$t_{min}$	°С	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1
Теплоємність середовища	$c$	Дж/(кг °С)	4187				
Вага середовища	$m$	кг	1				
Час опромінення	$\tau$	хв	60				
Енергія	$Q$	Дж	139845,8	128540,9	110118,1	67829,4	43544,8
Потужність нагрівання	$P$	Вт	38,846	35,706	30,588	18,842	12,096
К.к.д. генератора	$\eta$	%	26	30	41	42	81
Площа ванни	$S_{ванни}$	м <sup>2</sup>	0,02585				
Інтенсивність ультразвукових хвиль	$I$	Вт/м <sup>2</sup>	1502,75	1381,27	1183,3	728,88	467,92
Амплітуда ультразвукових хвиль	$a$	м	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$9,99 \cdot 10^{-7}$	$7,84 \cdot 10^{-7}$	$6,28 \cdot 10^{-7}$
Співвідношення	$a/d$	–	4328,67	4150,02	3841,13	3014,66	2415,45

Таблиця 2 – Розрахунок параметрів ультразвукових хвиль на частоті 20 кГц

Величини	Позначення	Од. виміру	Розрахунок				
			Потужність генератора	$P_2$	Вт	150	120
		%	100	80	50	30	10
Частота ультразвукових хвиль	$f$	кГц	20				
Густина середовища	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1000				
Максимальна температура	$t_{max}$	°С	52,9	49,7	48,8	31,5	26,9
Початкова температура	$t_{min}$	°С	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1
Теплоємність середовища	$C$	Дж/(кг °С)	4187				
Вага середовища	$m$	кг	1				
Час опромінення	$\tau$	хв.	60				
Енергія	$Q$	Дж	120585,6	107187,2	103418,9	30983,8	11723,6
Потужність нагрівання	$P$	Вт	33,496	29,774	28,727	8,607	3,257
К.к.д. генератора	$\eta$	%	22	25	38	19	22
Площа ванни	$S_{ванни}$	м <sup>2</sup>	0,02585				
Інтенсивність ультразвукових хвиль	$I$	Вт/м <sup>2</sup>	1295,78	1151,81	1111,31	332,94	125,98
Амплітуда ультразвукових хвиль	$a$	м	$2,09 \cdot 10^{-6}$	$1,97 \cdot 10^{-6}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-7}$
Співвідношення	$a/d$	–	8039,097	7579,33	7444,91	4074,99	2506,63

Довжина ультразвукової хвилі знаходиться за формулою  $\lambda = v / f$ . Тобто для ультразвуку 40 кГц довжина хвилі  $\lambda_{40} = 0,037$  м, для 20 кГц –  $\lambda_{20} = 0,074$  м.

Залежність інтенсивності ультразвукової хвилі від потужності випромінювача зображено на рис. 3.

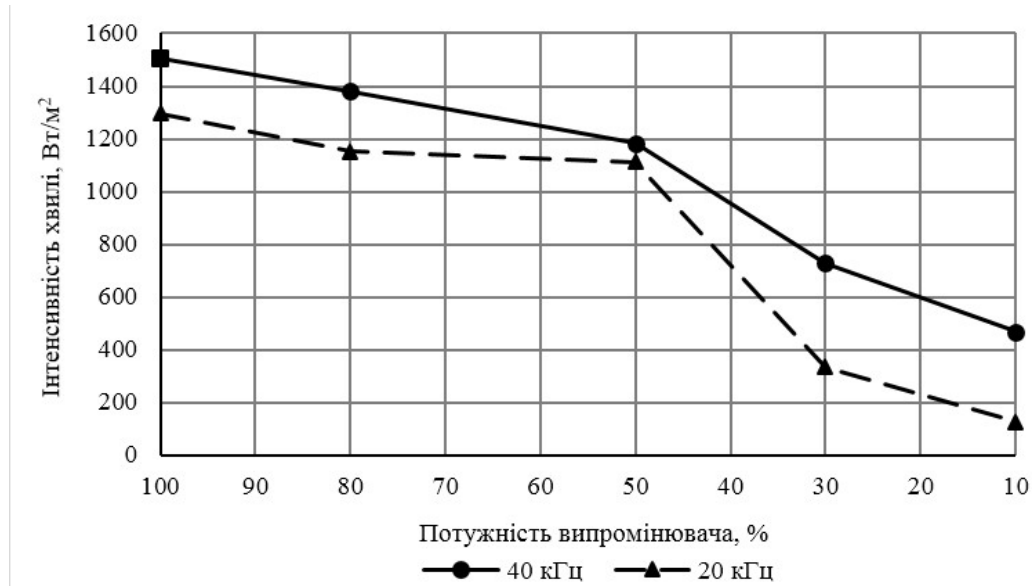


Рис. 3. Залежність інтенсивності ультразвукових хвиль від частоти і потужності випромінювача

Енергія випромінювача використовується, окрім нагрівання води, на нагрівання самого резервуара, навколишнього повітря, утворення певної кількості водяної пари та втрачається у передатних пристроях. К. к. д. генератора ультразвукових хвиль, розрахований у даному дослідженні (рис. 4), враховує енергію, яка витрачається безпосередньо на нагрівання води.

Залежність амплітуди ультразвукових хвиль від потужності випромінювача зображено на рис. 5.

З проведених дослідів, обрахованих величин та побудованих залежностей можна зробити наступні висновки.

При зменшенні потужності генератора ультразвукових хвиль інтенсивність випромінювання ультразвукових хвиль обох частот зменшується, що призводить до зменшення розігрівання водного середовища (зниження максимальної температури води. К. к. д. випромінювача враховує енергію, яка витрачається безпосередньо на

нагрівання води. Для ультразвукової хвилі 40 кГц цей к. к. д збільшується зі зменшенням потужності випромінювання, а для хвилі з частотою 20 кГц максимального значення досягає при 50 % потужності випромінювання. Для  $f = 40$  кГц розрахована довжина хвилі  $\lambda_{40} = 0,037$  м, для  $f = 20$  кГц –  $\lambda_{20} = 0,074$  м.

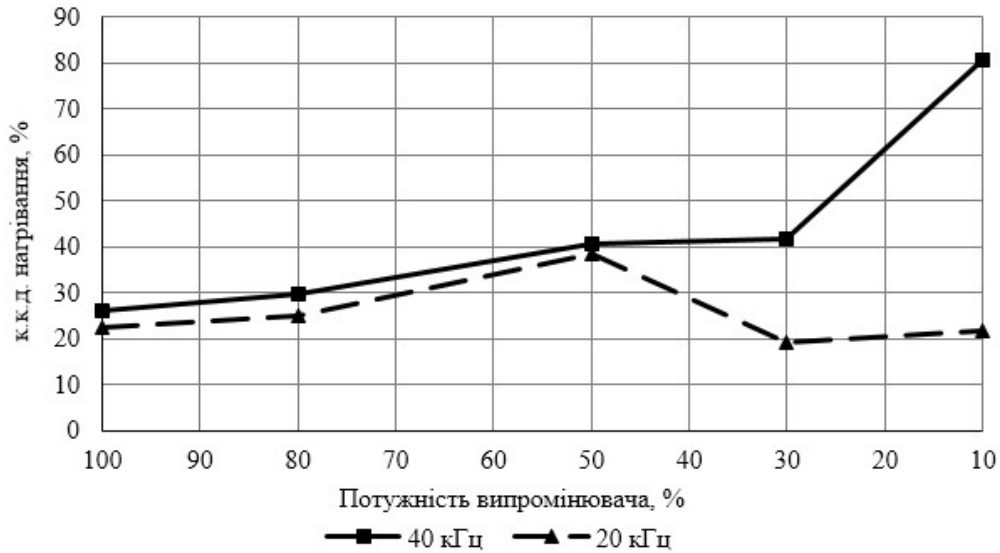


Рис. 4. Залежність коефіцієнта корисної дії нагрівання від частоти ультразвукових хвиль і потужності випромінювача

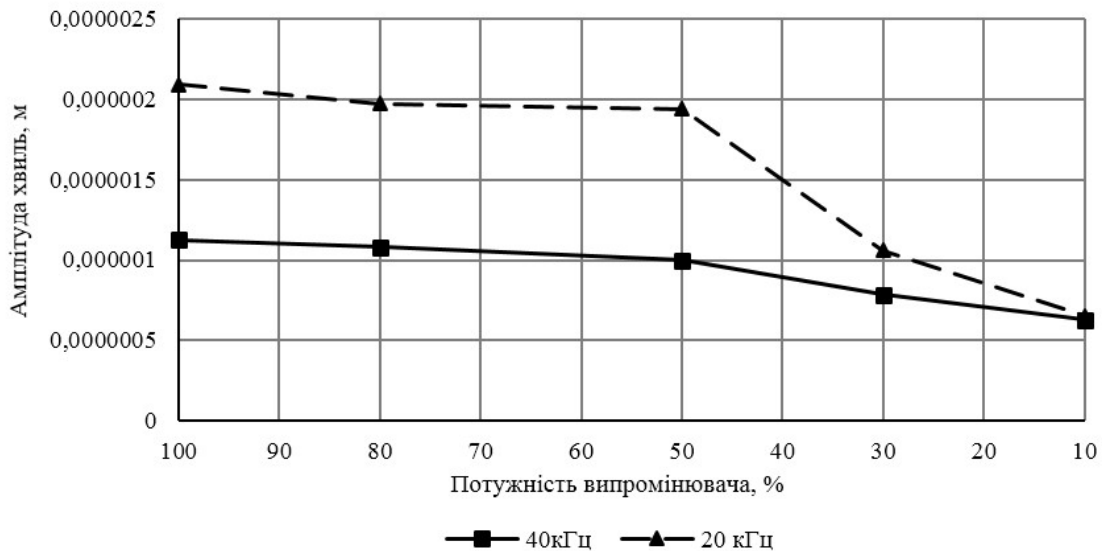


Рис. 5. Залежність амплітуди ультразвукових хвиль від частоти і потужності випромінювача

Амплітуда ультразвукової хвилі  $a$  зменшується при зменшенні потужності випромінювача. Для ультразвукової хвилі з частотою 20 кГц в цілому  $a$  більша, ніж для хвилі 40 кГц. Якщо розмір молекули води  $d$  близько  $2,6 \text{ \AA} = 2,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  [7], то

співвідношення  $a/d$  зменшується зі зменшенням потужності генератора і лежить в межах від  $2,4 \cdot 10^3$  ( $P_r = 10\%$ ) до  $4,3 \cdot 10^3$  ( $P_r = 100\%$ ) – для 40 кГц і від  $2,5 \cdot 10^3$  ( $P_r = 10\%$ ) до  $8 \cdot 10^3$  ( $P_r = 100\%$ ) – для 20 кГц. Тобто поступове збільшення температури водного середовища можна пояснити тертям молекул води, які під дією ультразвукових коливань мають величезні по відношенню до власних розмірів амплітуди коливання з надвисокою частотою зміни напрямку руху.

#### Література:

1. Кондратенко М.М., Савельев С.Г. Оцінка ефективності застосування ультразвуку в процесах підготовки металургійної сировини до переділу. *Гірничий вісник*. Науково-технічний зб. Кривий Ріг, 2021. Вип. 109. С 91–97. DOI: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-91-98.
2. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). М. 1983. 192 с.
3. Фармацевтична енциклопедія. Режим доступу <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/3407/kalorimetriya>.
4. Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. – М., 1972. – 424 с.
5. physicskpiua moodle ЗФ та ФТТ КПІ. Фізика для бакалаврів. Коливання і хвилі. Ч. II. Хвилі. 2 Пружні хвилі. Режим доступу <http://physics.zfftt.kpi.ua/mod/book/view.php?id=299&chapterid=58>
6. Вікіпедія. Вільна енциклопедія. Режим доступу [https://uk.wikipedia.org/wiki/Швидкість\\_звуку](https://uk.wikipedia.org/wiki/Швидкість_звуку)
7. Репозиторій електронних навчальних ресурсів системи дистанційного навчання Вінницького фізико-математичного ліцею №17. Режим доступу <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/15>