

УДК 539.196: 534.321.9

## АКТИВУЮЧА ДІЯ УЛЬТРАЗВУКУ НА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАЛИВНИХ УСТАНОВОК НА ГАЗОПОДІБНИХ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ЕНЕРГОНОСІЯХ

*Б.М. Ковалишин, кандидат технічних наук*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*Визначені основні характеристики ультразвуку, що переводять молекули кисню, азоту, метану і пропану у збуджений стан. Обґрунтовані параметри ультразвукового обладнання для активації молекул-реагентів реакції горіння.*

*Ультразвук, енергія, частота, амплітуда, молекула, активація.*

Сучасний рівень розвитку економіки всіх країн світу визначається наявністю та ефективністю використання паливно-енергетичних ресурсів. Терміни вичерпання як розвіданих, так і прогнозованих запасів традиційних вуглеводневих енергоносіїв вимірюються уже кількома десятками років з врахуванням тенденції до постійного збільшення їх споживання [1, 2]. Пролонгування термінів використання невідновлюваних традиційних енергоносіїв (вугілля, нафти, природного газу і ядерного палива) важливе як з точки зору подовження часу для проведення досліджень із обґрунтування принципово нових способів та обладнання для отримання енергії, так і з метою збільшення термінів їх використання в хімічній і харчовій галузях і зменшення негативного впливу на довкілля. Застосування способу активації молекул для підвищення енергоефективності паливних установок [3] є тим напрямком розвитку технологій спалювання, який, на нашу думку, дозволить збільшити строки використання викопних вуглеводневих енергоносіїв і тому є актуальним і своєчасним.

**Мета роботи** – обґрунтування способу підвищення ефективності енергогенеруючих установок через використання ультразвуку для активації молекул-реагентів реакції горіння газоподібних вуглеводневих палив у повітрі.

**Стан проблеми.** Активація молекул, які беруть участь у хімічних реакціях, може здійснюватись різними способами. До таких способів відносяться: термоактивація, ультразвукова активація, фотоактивація, активація швидкими електронами, активація в магнітному полі, активація в електричному полі, активація радіоактивними частинками та інші способи.

Одним з енергетичних чинників, що, на наш погляд, може бути застосований для активації молекул, є ультразвук. За своєю фізичною природою ультразвук являє собою пружні коливання і хвилі, тобто процеси механічного стиску і розрідження, що чергуються в часі, та поширюються у твердому, рідкому і газоподібному середовищах.

Від чутного звуку ультразвук відрізняється лише частотою. Чутний звук охоплює діапазон частот від 16 Гц до 20 кГц, а ультразвук – область нечутних частот від 20 кГц до  $10^6$  кГц [4]. Найбільш короткохвильове коливання

частинок пружного середовища з частотою  $10^6 - 10^8$  кГц носить назву гіперзвуку. Чим вища частота звукових коливань, тим вони можуть справляти більший вплив безпосередньо на молекули, так як їх довжина хвиль стає співмірною з міжмолекулярними і внутрішньомолекулярними відстанями.

Частинки середовища, у якому поширюється ультразвук, періодично коливаються біля положення рівноваги. Досить наближено можна вважати, що коливання часток відбуваються в часі за косинусоїдальним законом [5] з амплітудою зсуву  $A$ . Згущення і розрідження, що утворюються в газовому середовищі при проходженні в ньому поздовжньої пружної хвилі, додатково змінюють тиск відносно середнього (статичного) тиску. Ця додаткова змінна частина тиску називається звуковим тиском. Амплітуда звукового тиску (Па) визначається за формулою:

$$\rho_{zm} = 2\pi\rho c f A \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – швидкість поширення пружної звукової хвилі, м/с;  $f$  – частота коливань, Гц;  $A$  – амплітуда зсуву, м.

Величина  $\rho c$  – найважливіша акустична характеристика середовища, яку ще називають хвильовим опором або звуковим імпедансом.

Позитивний ефект при застосуванні ультразвукових коливань також полягає у турбулізації факелу горіння і прилеглої до нього області. При цьому ультразвукові коливання діють як на частинки, так і на оточуюче середовище [6].

**Теоретичне обґрунтування застосування ультразвуку для активації молекул.** Ультразвукова активація пояснюється передачею кінетичної енергії від генератора коливань молекулам. Далі молекули непружно співударяються з іншими молекулами. Якщо енергія молекул-донорів більша за величину деякого енергетичного бар'єру (енергії активації), то молекули-реципієнти перейдуть на більш високий (активований) енергетичний рівень. А саме активовані молекули, за С. Арреніусом, є готовими до участі в хімічних реакціях [7,8]. Частина енергії ультразвукових коливань перетворюється в теплову енергію, що також сприяє активації молекул. З кожним наступним періодом проходить зменшення інтенсивності ультразвукових коливань. Зменшення енергії молекул залежить від компонентного складу, в'язкості, будови молекул кожної компоненти, тиску, температури пружного середовища та інших факторів. Залежність амплітуди ультразвукових коливань від часу і кутової частоти можна записати у вигляді:

$$A = A_{\max} \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де  $A_m$  – амплітуда коливань, м;

$\omega$  – кутова частота коливань, рад/с;

$t$  – час, с;

$\varphi$  – зсув фаз, рад.

Часто в хімічних процесах ультразвук може виступати як каталізатор. Речовини, які беруть участь у реакції, з його допомогою робляться дрібнодисперсними, що набагато підвищує їх хімічну активність. Якщо серед продуктів реакції є газ, то ультразвук сприяє його швидкому виведенню з

суміші. Ультразвукове опромінення прискорює багато реакцій з участю органічних речовин.

При поширенні ультразвукової хвилі в середовищі відбувається перенос енергії. Енергію хвилі, що проходить за одиницю часу через одиничну площу, перпендикулярну поширенню хвилі, називають інтенсивністю ультразвуку  $I$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) і визначають за формулою:

$$I = \rho_{\text{зм}}^2 / 2\rho c = 2\rho c \pi^2 f^2 A^2 \quad (3)$$

При поширенні акустичних хвиль в будь-якому середовищі звуковий тиск визначається за формулою

$$p = p_0 + p_1 = p_0 + p_m \cos \omega(t - \frac{r}{v}), \quad (4)$$

де  $p_0$  – тиск у незбуреному середовищі,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$p_1$  – змінний тиск хвилі,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$p_m$  – амплітудне значення звукового тиску,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$r$  – відстань частки від випромінюючої поверхні, м;

$v$  – швидкість поширення хвиль, м/с.

Для ідеальних газів швидкість звуку рівна

$$v = \sqrt{\gamma \frac{R}{\mu} T}, \quad (5)$$

де  $R$  – універсальна газова стала;

$T$  – термодинамічна температура;

$\mu$  – молекулярна маса;

$\gamma$  – стала для кожного газу величина, що залежить від будови молекул газу.

Амплітуду звукового тиску можна визначити з виразу

$$p_m = \rho \cdot v \cdot \omega \cdot A_m = \rho \cdot v \cdot V_m = z \cdot V_m, \quad (6)$$

де  $\rho$  – густина середовища,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$A_m$  – максимальна амплітуда коливань, м;

$V_m$  – максимальна коливальна швидкість часток, м/с;

$V_m = \omega \cdot A_m$ ;

$z$  – хвильовий опір (акустичний імпеданс) середовища,  $\text{Па} \cdot \text{с}/\text{м}^3$ .

Промисловістю випускаються багато типів ультразвукових генераторів. Технічні характеристики деяких з них приведені в таблиці 1. Робоча частота більшості вказаних генераторів ( $f$ ) рівна 22 або 44 кГц. Амплітуда коливань магнітострикційного перетворювача ( $A$ ) знаходиться в межах 10...60 мкм.

Враховуючи амплітуду і частоту коливань магнітострикційного чи п'єзоелектричного перетворювача, молекулярну масу найбільш імовірних досліджуваних молекул-реагентів, розрахуємо енергію останніх і занесемо їх в таблицю 2. Так як молекулярна маса кисню  $M_{\text{O}_2} = 32$ , азоту  $M_{\text{N}_2} = 28$ , метану  $M_{\text{CH}_4} = 16$ , пропану  $M_{\text{C}_3\text{H}_8} = 44$  та співвідношення  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ , отримаємо енергію молекул в eV.

### 1. Технічні характеристики ультразвукових генераторів

Марка генератора	Потужність, споживана з мережі, кВт	Вихідна потужність (підводиться до електроакустичного перетворювача), кВт	Робоча частота, кГц
УЗГ 1-0,04/22	0,09	0,04	22
УЗГ 4-0,1	0,15	0,1	18
УЗТА-0,15/22-О	0,15	0,1	22
УЗТА-0,2/22-ОМ	0,2	0,15	22
УЗТА „Надежда”	0,25	0,18	44
УЗАГС-0,3/22-О	0,3	0,2	22
УЗАГС-0,4/22-О	0,4	0,25	22
УЗГ 1-0,25	0,4	0,25	18
УЗТА-0,63/22-ОМ	0,63	0,35	22
УЗТА-0,8/22-ОМ	0,8	0,45	22
УЗГ 3-0,4/22	0,8	0,4	22
УЗТА-1/22-ОМ	1	0,6	22
УЗГ 5-0,63	1,2	0,63	18; 22
УЗГ 10-1,6	2	1,6	18
УЗГ 2-4	5,7	4	18; 22
УЗГ 1-10/22	12	10	18; 22
УЗГ 2-25/22	34	25	18; 22

Вищевказані молекули від генератора ультразвуку отримують енергію

$$E = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (7)$$

де  $m$  – маса молекули азоту;  $v$  – швидкість молекули, надану їй ультразвуковим перетворювачем, визначимо за виразом:

$$v = A \cdot f, \quad (8)$$

Тоді вираз 7 для розрахунку енергії молекул набуде вигляду

$$E = \frac{m \cdot A^2 f^2}{2}, \quad (9)$$

### 2. Енергія молекул кисню, азоту, метану і пропану в залежності від параметрів ультразвукового випромінювання

Частота, кГц	Амплітуда коливань, $m \cdot 10^{-6}$	Швидкість стриктора, м/с	Енергія молекули, еВ			
			Кисень	Азот	Метан	Пропан
1	2	3	4	5	6	7
22	10	0,22	$0,805 \cdot 10^{-8}$	$0,705 \cdot 10^{-8}$	$0,403 \cdot 10^{-8}$	$1,107 \cdot 10^{-8}$
	20	0,44	$3,21 \cdot 10^{-8}$	$2,81 \cdot 10^{-8}$	$1,604 \cdot 10^{-8}$	$4,412 \cdot 10^{-8}$
	40	0,88	$12,87 \cdot 10^{-8}$	$11,27 \cdot 10^{-8}$	$6,433 \cdot 10^{-8}$	$17,690 \cdot 10^{-8}$
	60	1,32	$28,88 \cdot 10^{-8}$	$25,29 \cdot 10^{-8}$	$14,441 \cdot 10^{-8}$	$39,714 \cdot 10^{-8}$
44	10	0,44	$3,21 \cdot 10^{-8}$	$2,81 \cdot 10^{-8}$	$1,604 \cdot 10^{-8}$	$4,412 \cdot 10^{-8}$
	20	0,88	$12,87 \cdot 10^{-8}$	$11,27 \cdot 10^{-8}$	$6,433 \cdot 10^{-8}$	$17,690 \cdot 10^{-8}$
	40	1,76	$51,34 \cdot 10^{-8}$	$44,96 \cdot 10^{-8}$	$25,671 \cdot 10^{-8}$	$70,595 \cdot 10^{-8}$
	60	2,64	$115,52 \cdot 10^{-8}$	$101,17 \cdot 10^{-8}$	$57,759 \cdot 10^{-8}$	$158,837 \cdot 10^{-8}$

1	2	3	4	5	6	7
100	10	1	$1,66 \cdot 10^{-7}$	$1,45 \cdot 10^{-7}$	$0,830 \cdot 10^{-7}$	$2,283 \cdot 10^{-7}$
	20	2	$6,63 \cdot 10^{-7}$	$5,81 \cdot 10^{-7}$	$3,315 \cdot 10^{-7}$	$9,115 \cdot 10^{-7}$
	40	4	$26,52 \cdot 10^{-7}$	$23,22 \cdot 10^{-7}$	$13,258 \cdot 10^{-7}$	$36,461 \cdot 10^{-7}$
	60	6	$59,66 \cdot 10^{-7}$	$52,25 \cdot 10^{-7}$	$29,831 \cdot 10^{-7}$	$82,037 \cdot 10^{-7}$
500	10	5	$41,46 \cdot 10^{-7}$	$36,31 \cdot 10^{-7}$	$20,730 \cdot 10^{-7}$	$57,008 \cdot 10^{-7}$
	20	10	$165,74 \cdot 10^{-7}$	$145,15 \cdot 10^{-7}$	$82,871 \cdot 10^{-7}$	$227,896 \cdot 10^{-7}$
	40	20	$6,63 \cdot 10^{-5}$	$5,81 \cdot 10^{-5}$	$3,315 \cdot 10^{-5}$	$9,115 \cdot 10^{-5}$
	60	30	$13,06 \cdot 10^{-5}$	$11,44 \cdot 10^{-5}$	$6,529 \cdot 10^{-5}$	$17,956 \cdot 10^{-5}$
1000	10	10	$165,74 \cdot 10^{-7}$	$145,15 \cdot 10^{-7}$	$82,871 \cdot 10^{-7}$	$227,896 \cdot 10^{-7}$
	20	20	$6,63 \cdot 10^{-5}$	$5,81 \cdot 10^{-5}$	$3,315 \cdot 10^{-5}$	$9,115 \cdot 10^{-5}$
	40	40	$26,52 \cdot 10^{-5}$	$23,22 \cdot 10^{-5}$	$13,258 \cdot 10^{-5}$	$36,461 \cdot 10^{-5}$
	60	60	$5,23 \cdot 10^{-4}$	$4,58 \cdot 10^{-4}$	$2,615 \cdot 10^{-4}$	$7,191 \cdot 10^{-4}$
10000	10	100	$0,332 \cdot 10^{-2}$	$0,291 \cdot 10^{-2}$	$0,166 \cdot 10^{-2}$	$0,457 \cdot 10^{-2}$
	20	200	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$0,765 \cdot 10^{-2}$	$1,829 \cdot 10^{-2}$
	40	400	$5,30 \cdot 10^{-2}$	$4,64 \cdot 10^{-2}$	$2,650 \cdot 10^{-2}$	$7,288 \cdot 10^{-2}$
	60	600	$11,93 \cdot 10^{-2}$	$10,45 \cdot 10^{-2}$	$5,965 \cdot 10^{-2}$	$16,404 \cdot 10^{-2}$
100000	10	1000	0,332	0,291	0,17	0,46
	20	2000	1,33	1,15	0,67	1,83
	40	4000	5,3	4,64	2,65	7,29
	60	6000	11,93	10,45	5,97	16,40
200000	10	2000	1,33	1,15	0,67	1,83
	20	4000	5,3	4,64	2,65	7,29
	40	8000	21,21	18,57	10,61	29,16
	60	12000	47,73	41,8	23,87	65,63
400000	10	4000	2,65	2,32	1,33	3,64
	20	8000	21,21	18,57	10,61	29,16
	40	16000	42,45	37,17	21,23	58,37
	60	24000	95,44	83,57	47,72	131,23
1000000	10	10000	33,15	29,03	16,58	45,58
	20	20000	132,58	116,09	66,29	182,30
	40	40000	530,34	464,4	265,17	729,22
	60	60000	1193,26	1044,89	596,63	1640,73

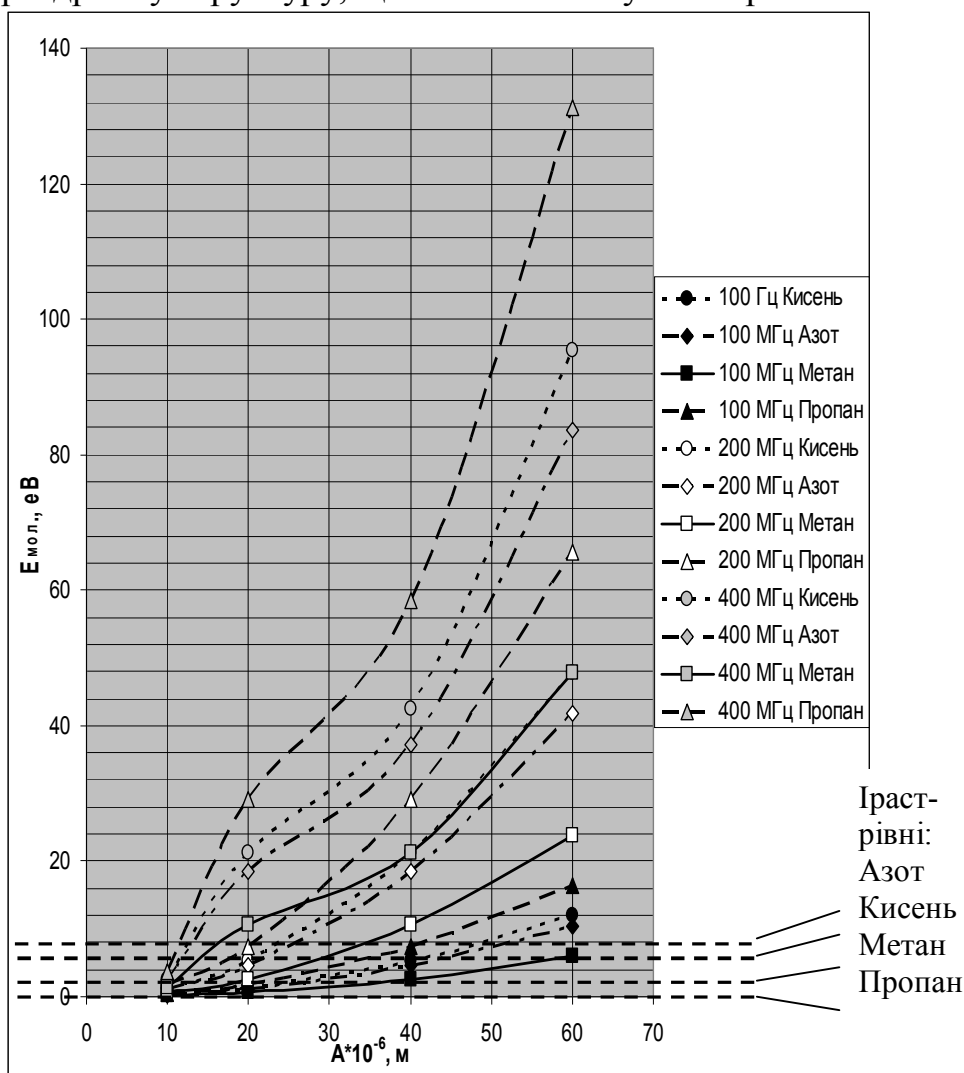
Перші резонансні рівні збудження молекул (іраст-рівні) найбільш часто використовуваних в теплогенеруванні газоподібних алканів і основних складових повітря приведені в таблиці 3.

### 3. Енергетичні характеристики молекул

Молекула	Формула	Енергія активації	
		Дж/моль	еВ
Метан	CH <sub>4</sub>	$11,48 \cdot 10^5$	11,90
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$10,48 \cdot 10^5$	10,86
Кисень	O <sub>2</sub>	$14,12 \cdot 10^5$	14,64
Азот	N <sub>2</sub>	$15,49 \cdot 10^5$	16,05

Порівняємо енергетичні характеристики молекул-реагентів з набутою ними енергією від дії на них ультразвуком. З таблиці 1 і графіка на рис. 1 видно, що

молекули пропану набувають енергії, рівної і більшої за енергію ірост-рівнів при частоті ультразвукових коливань вищих за 100 МГц та амплітуді більшій за 48 мкм. Активація молекул метану відбувається при частоті ультразвуку 200 МГц і амплітуді коливань не меншій за 43 мкм. Для ультразвукової активації молекул кисню та азоту на частоті 200 МГц амплітуда повинна бути більшою за 33 мкм і 38 мкм, відповідно. Із вищесказаного можна зробити висновок, що молекули метану вимагають найбільшої енергетичної дії для своєї активації. Разом з цим, молекули метану відрізняються своєю слабкою поляризацією через тетраедричну структуру, що також зменшує імовірність їх активації.



**Рис. 1. Залежність кінетичної енергії молекул азоту, кисню, метану і пропану від амплітуди ультразвукових коливань при різних частотах**

Сучасна промисловість не випускає генератори і перетворювачі ультразвуку вказаних параметрів. Тому, для проведення експериментальних досліджень необхідно розробити і виготовити ультразвукове обладнання, яке забезпечить генерування коливань з частотою 200 і більше МГц та амплітудою понад 30 мкм.

### Висновки

1. Ультразвукова активація найбільш часто використовуваних в теплогенеруванні газоподібних алканів і основних складових повітря можлива під дією коливань з частотою не меншою за 200 МГц та амплітудою 33 – 43 мкм.
2. Найменше із перерахованих молекул піддаються активації молекули метану, що пояснюється їх будовою і поляризованістю.
3. Використання ультразвуку для активації молекул вимагає розробки високоенергетичного обладнання з генерацією коливань частотою 200 і більше МГц та амплітудою коливань понад 30 мкм.

### Список літератури

1. Праховник А.В. Енергетичний менеджмент: Навчальний посібник / А.В. Праховник, В.П. Розен, О.В. Разумовський та ін.–К.: Київ. нотна ф-ка, 1999. –184 с.
2. Корчемний М. Енергозбереження в агропромисловому комплексі / Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. – Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. – 976 с.
3. Патент №37572 Україна, МПК F23C 99/00. Спосіб підвищення ефективності паливних установок на вуглеводневому паливі та пристрій для його реалізації / Ковалишин Б.М. (Україна) / Заяв.28.07.2006; опубл. 10.12.2008. Бюл. №23.
4. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280 с.
5. Орир Дж. Физика.–М.: Мир, т.1, 1981. –336 с.
6. Хмелев В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов.– Бийск: Изд-во АГТУ, 2010. – 178 с.
7. Физическая химия. / Под ред. К.С. Краснова. М.: Высшая школа, 2001.– Кн. 1.– 512 с; кн. 2. – 319 с.
8. Стромберг А.Г. Физическая химия / Стромберг А.Г., Семченко Д.П. – М.: Высшая школа, 2001. – 527 с.

*Определены основные характеристики ультразвука, которые переводят молекулы кислорода, азота, метана и пропана в возбужденное состояние. Обоснованы параметры ультразвукового оборудования для активации молекул-реактивов реакции горения.*

***Ультразвук, энергия, частота, амплитуда, молекула, активация.***

*The basic characteristics of ultrasound, which translate molecules of oxygen, nitrogen, methane and propane in the excited state were defined. Reasonable parameters of ultrasonic equipment for activating reagent molecules combustion reaction were grounded.*

***Ultrasound, energy, frequency, amplitude, molecule, activation.***