



Henryk Radomiak¹, Korneliusz Łukasiak², Hubert Matysiak²,
Dorota Musiał¹, Agnieszka Bala-Litwiniak¹

¹ Katedra Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa
e-mail: henrad@wip.pcz.pl

² Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa

WYGASZANIE PŁOMIENIA FALĄ AKUSTYCZNĄ

Streszczenie. Płomień w pewnych przypadkach może być śmiertelnym zagrożeniem dla życia, zdrowia lub mienia ludzi. Dlatego też w czasie pożaru potrzebna jest szybka reakcja, mająca na celu ugaszenie lub przynajmniej zapobiegnięcie rozprzestrzenianiu się ognia. Oprócz znanych, konwencjonalnych metod gaszenia pożaru (woda, piana, dwutlenek węgla) można też zastosować falę dźwiękową. Fala akustyczna właściwie ukierunkowana, o określonej częstotliwości i mocy niesie ze sobą odpowiednią ilość energii, która powoduje sinusoidalne zmiany ciśnienia akustycznego i, natrafiając na płomień, przyczynia się do zerwania jego strugi i rozdzielenia na wiele części. W niniejszej pracy przedstawiono wpływ drgań akustycznych na stabilność płomienia wybranych paliw ciekłych oraz określono go dla jakich wartości częstotliwości oraz mocy fali akustycznej nastąpi wygaszenie tego płomienia. Odpowiednie badania przeprowadzono dla oleju napędowego, benzyny, parafiny oraz mieszanki gliceryny i oleju napędowego.

Słowa kluczowe: gaszenie płomienia, fala akustyczna, spalanie, pożar.

FLAME EXTINGUISHING BY THE ACOUSTIC WAVE

Abstract. In some cases, the flame may be a deadly threat for life, health or property of people. Therefore, in case of fire the fast response aiming to extinguish or at least prevent the spread of fire are very important. Besides the known conventional methods of fire extinguishing such as: water, foam, carbon dioxide, the sound wave can also be employed. Properly oriented acoustic wave of specific frequency and power, generates the appropriate amount of energy, that causes a sinusoidal changes of acoustic pressure, therefore encountering on the flame it contributes to the flame breaking and separation into a number of parts. In this study, the influence of acoustic vibrations on the stability of the flame of chosen liquid

fuels were investigated. The effects of frequency and power of the acoustic wave on the flame extinguishing were also determined. Corresponding investigations were carried for diesel, gasoline, paraffin, and mixtures of pharmaceutical glycerin and diesel oil.

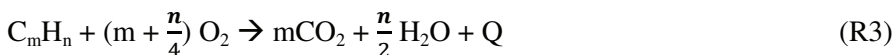
Keywords: flame extinguishing, acoustic wave, combustion, fire.

Podstawy i wielkości charakteryzujące spalanie

Spalaniem nazywa się gwałtownie przebiegającą reakcję łączenia się części palnych paliwa z utleniaczem. Reakcja ta jest reakcją egzotermiczną, jednak w odróżnieniu od innych reakcji tego typu, przy spalaniu widoczny jest płomień. Proces spalania można opisać za pomocą równań stechiometrycznych. Równania te przedstawiają substraty składające się na reakcję oraz jej produkty i ilość ciepła, która wydzielona została podczas przebiegu reakcji. Dla przykładu rozpatrzono stechiometryczne reakcje spalania wodoru i metanu [8].



Oraz reakcję spalania dla dowolnego węglowodoru.



gdzie:

m – ilość atomów węgla w molekułe węglowodoru,

n – ilość atomów wodoru w molekułe węglowodoru,

Q – ciepło wydzielone w reakcji.

Istotną wartością charakteryzującą proces spalania jest prędkość, z jaką to spalanie przebiega. W tym miejscu należy wyróżnić dwa rodzaje prędkości – *równomierną prędkość spalania*, którą można zdefiniować jako prędkość liniową, z jaką front płomienia przemieszcza się wzdłuż palnej mieszanki oraz *normalną prędkość spalania*. Wartość prędkości normalnej paliwa można określić liczbowo, za pomocą wzoru:

$$u_n = u_r \frac{\pi r^2}{S}, \quad (1)$$

gdzie:

u_n – wartość normalnej prędkości spalania,

u_r – wartość równomiernej prędkości spalania,

S – rzeczywista powierzchnia frontu płomienia,

r – promień naczynia.

Prędkość normalna paliwa jest wielkością stałą, charakteryzującą dany gaz palny. Dla mieszanin gazowych prędkość tą można obliczyć:

$$u_n^{\max} = \frac{C^{\max} \left(\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{C_i^{\max}} u_{ni} \right)}{\sum_{i=1}^n r_i}, \quad (2)$$

gdzie:

u_n^{\max} – maksymalna normalna prędkość mieszanki paliwowej,

r_i – procentowa zawartość składników mieszanki,

C_i^{\max} – stężenie poszczególnych składników mieszanki, odpowiadające maksymalnej normalnej prędkości,

u_{ni} – maksymalna prędkość rozprzestrzeniania się płomienia dla kolejnych składników mieszanki,

C^{\max} – stężenie gazu w mieszaninie z powietrzem, obliczane ze wzoru:

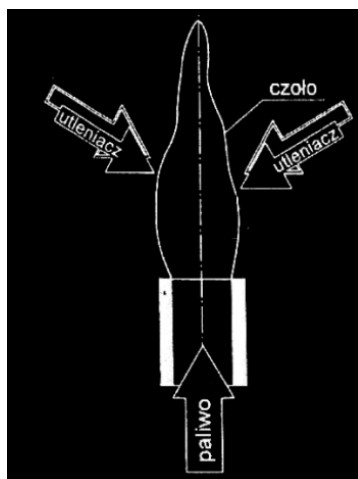
$$C^{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{C_i^{\max}}}, \quad (3)$$

Spalanie dyfuzyjne

Dyfuzyjne spalanie paliwa, w przeciwieństwie do spalania kinetycznego, występuje, gdy substancja palna nie została wstępnie wymieszana z utleniaczem. Tlen, który w przypadku spalania dyfuzyjnego jest najczęściej spotykanym utleniaczem – zostaje pobrany z otaczającej atmosfery, co powoduje umiejscowienie strefy mieszania za strefą podgrzania paliwa. W tym przypadku powierzchnia frontu płomienia znajduje się w przestrzeni, w której stosunek nadmiaru powietrza $\lambda \geq 1$ (paliwo oraz utleniacz są zmieszane w sposób stechiometryczny). Przykład spalania (płomienia) dyfuzyjnego pokazano na rys. 1.

Rozróżnia się:

- spalanie dyfuzyjne laminarne (dyfuzja o charakterze molekularnym, transport ciepła wytworzonego podczas reakcji spalania – za pomocą przewodnictwa),
- spalanie dyfuzyjne turbulენტne (wymiana masy, transport ciepła – wymiana masy, ciepła i energii) [3, 4, 8, 9]. Pożar i występujący w nim płomień praktycznie zawsze ma charakter dyfuzyjny.



Rys.1. Schemat płomienia dyfuzyjnego [9]

Sposoby wygaszania płomienia

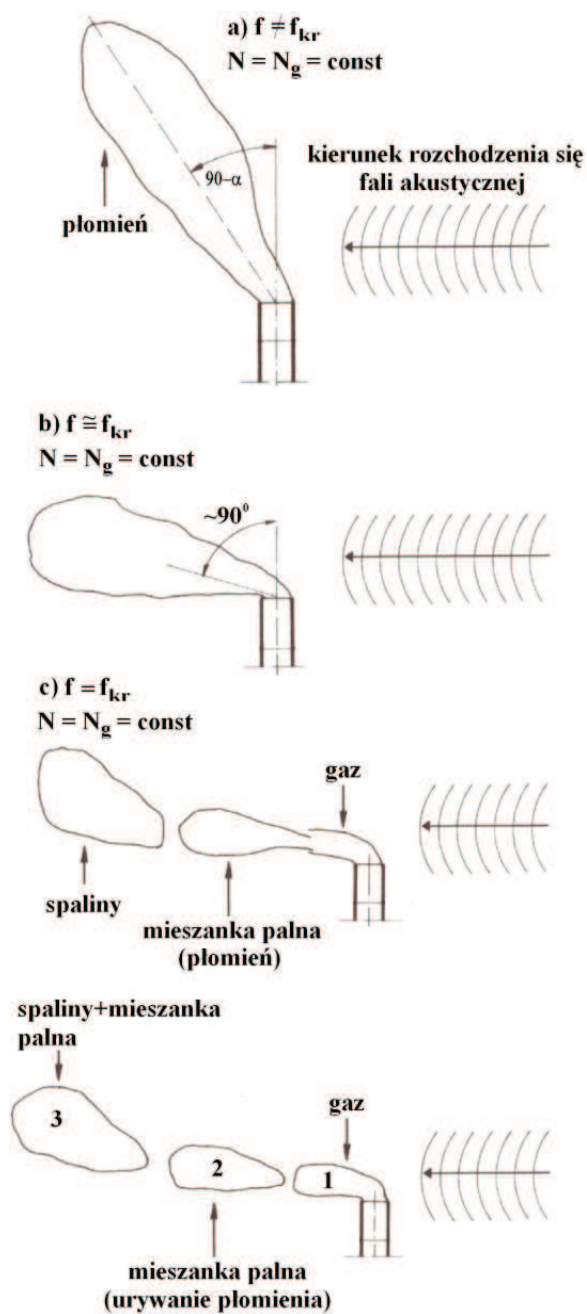
Wygaszenie płomienia może być rezultatem wielu procesów dotyczących samej substancji palnej, jak i oddziaływania otoczenia na proces spalania. Główny mechanizm wygaszania płomienia polega na spadku temperatury oraz prędkości rozprzestrzeniania się frontu płomienia poniżej granic palności. Drugim, co do ważności, jest proces wygaszania poprzez rozciąganie frontu płomienia. Miarą rozciągania płomienia jest liczba K , która wyraża elementarną zmianę (przyrost) powierzchni frontu płomienia [9]:

$$K = \frac{1}{\delta A} \frac{d(\delta A)}{d}, \quad (4)$$

gdzie: δA to elementarna powierzchnia płomienia.

Współczesne metody mają na celu zwiększanie efektywności konwencjonalnych środków gaśniczych np. roztworów wodnych poprzez wprowadzanie nowych, wieloskładnikowych i powierzchniowo czynnych związków [12], stosowanie tzw. mgły wodnej [2, 5, 7, 15] czy też stosowanie tzw. czystych środków gaśniczych tj. gazów gaśniczych, które stanowią alternatywę dla wycofanych halonów [6, 14].

Oprócz klasycznych metod wygaszania płomienia można zastosować niekonwencjonalne. Jedną z nich jest wygaszanie płomienia za pomocą fali akustycznej [1, 10, 13, 16,]. Mechanizm gaszenia płomienia taką metodą przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Mechanizm zerwania ciągłości strugi płomienia na skutek działania fali akustycznej: f - częstotliwość fali, f_{kr} - częstotliwość krytyczna, N - moc akustyczna, N_g - graniczna moc akustyczna [11]

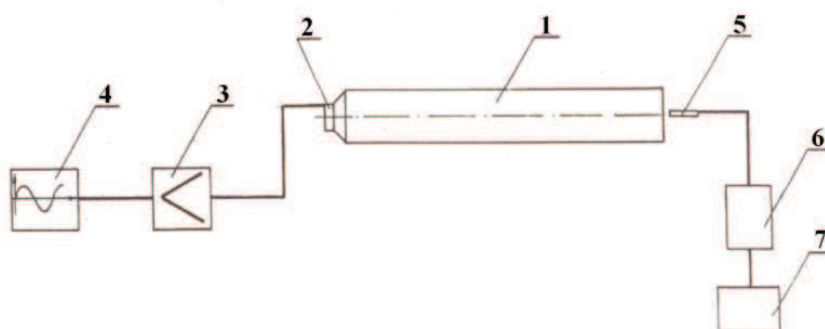
Metodyka badań

Wygaszanie płomienia falą akustyczną

Wygaszanie płomienia przeprowadzono za pomocą układu, na który składało się kilka urządzeń. Dla każdego pomiaru ustawiano odpowiednio parametry wzmacniacza, który regulował moc, z jaką pracował głośnik oraz parametry generatora częstotliwości, za pomocą którego ustalano częstotliwość dźwięku głośnika. Wyjście głośnika było bezpośrednio połączone z falowodem, który generował falę akustyczną o określonej mocy, zaś na drugim końcu falowodu, zawsze w odległości 3 cm od jego wylotu, znajdował się tygiel z paliwem lub świeczka. Wartości napięcia i natężenia prądu płynącego do głośnika odczytywano za pomocą amperomierza i woltomierza. Spalanymi substancjami palnymi były kolejno: parafina (świeca), benzyna, olej napędowy, oraz olej napędowy wymieszany z gliceryną farmaceutyczną w stosunku 1:1. Odmierzona masa paliwa (nie więcej niż 5 g) była podgrzewana w tyglu za pomocą palnika gazowego, aż do momentu zapłonu. Wygaszanie płomienia miało nastąpić dla częstotliwości z zakresu 30–150 Hz, choć trzeba zaznaczyć, że wygaszenie całej rozpiętości tego zakresu sprawdzało się jedynie dla płomienia świecy, który miał najmniejszą moc. W przypadku benzyny, oleju napędowego jak i mieszaniny oleju napędowego i gliceryny skutecznymi wartościami były jedynie te z zakresu 30–50 Hz i to już przy osiągnięciu maksymalnych wartości mocy generowanej przez wzmacniacz.

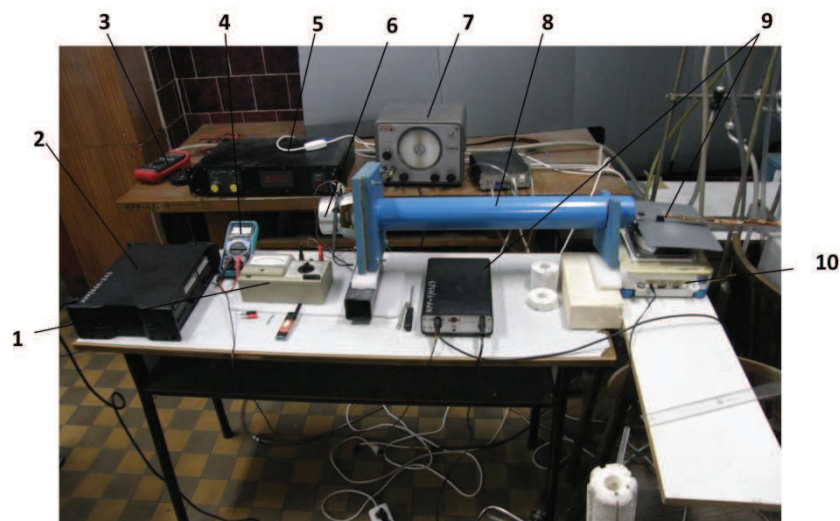
Opis stanowiska badawczego

Ideę stanowiska do gaszenia płomienia falami akustycznymi przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska do badania parametrów generowanej fali akustycznej: 1 - tunel aerodynamiczny, 2 - głośnik, 3 - wzmacniacz, 4 - generator częstotliwości, 5 - mikrosonda pomiarowa, 6 - wzmacniacz sygnału sondy, 7 - komputerowy system pomiarowy Dysy Lab

Widok ogólny stanowiska pomiarowego pokazano na rys. 4.

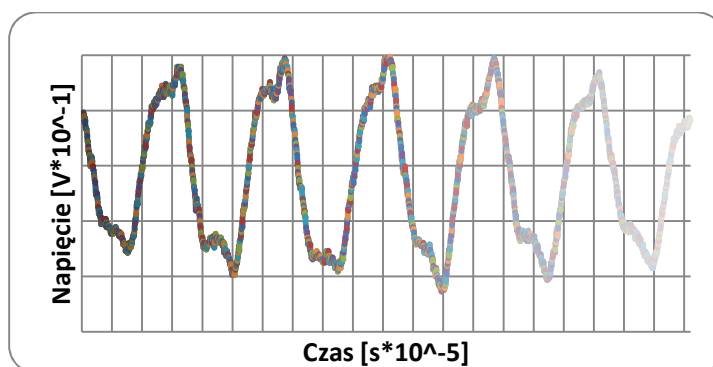


Rys. 4. Stanowisko pomiarowe: 1 - amperomierz, 2 - karta pomiarowa, 3 - woltmierz, wraz z amperomierzem służący do ustalenia mocy generowanej przez wzmacniacz, 4 - woltmierz połączony z sondą akustyczną, pozwalający odczytać ciśnienie akustyczne w falowodzie, 5 - wzmacniacz, 6 - głośnik niskotonowy, 7 - lampowy generator częstotliwości, 8 - falowód, 9 - sonda akustyczna, 10 - waga cyfrowa służąca do pomiaru ubytku masy

Wyniki pomiarów

W tabeli 1 podano przykładowe wartości ciśnienia akustycznego dla początkowej mocy głośnika 5W.

Podstawowe parametry dla jednej z wybranych fali akustycznej przedstawia rys. 5.

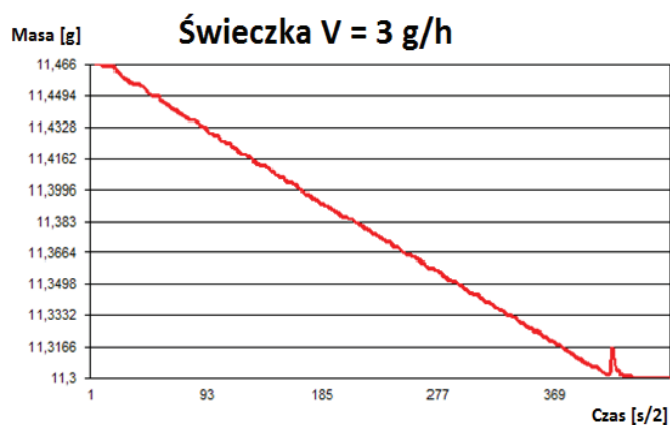


Rys. 5. Oscylacja fali akustycznej o częstotliwości 60 Hz. $T = 0,1s$

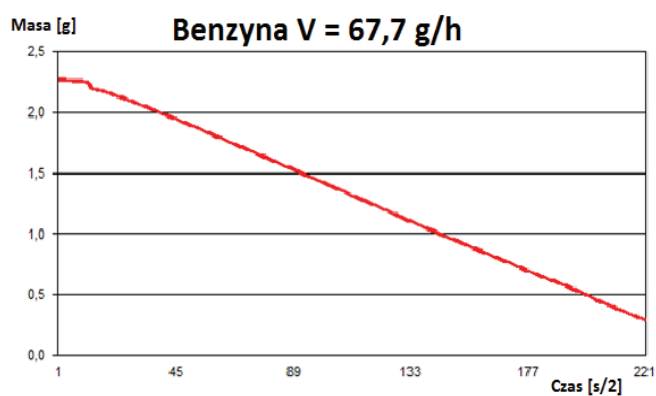
Tab. 1. Pomiar ciśnienia akustycznego dla mocy początkowej 5 W

Hz	U_s , mV	U, V	I, A	P, W	P_{ak} , Pa
30,00	1,00	11,40	0,45	5,13	3,50
35,00	2,20	12,97	0,43	5,58	7,70
40,00	3,10	13,90	0,46	6,39	10,85
45,00	3,00	14,00	0,60	8,40	10,50
50,00	3,20	13,90	0,70	9,73	11,20
55,00	3,40	13,90	0,75	10,43	11,90
60,00	3,30	13,80	0,75	10,35	11,55
65,00	3,50	13,67	0,75	10,25	12,25
70,00	3,70	13,58	0,75	10,19	12,95
75,00	3,70	13,50	0,75	10,13	12,95
80,00	3,90	13,47	0,75	10,10	13,65
85,00	4,00	13,45	0,75	10,09	14,00
90,00	4,30	13,40	0,75	10,05	15,05
95,00	4,30	13,36	0,70	9,35	15,05
100,00	4,30	13,36	0,70	9,35	15,05
105,00	4,90	13,28	0,70	9,30	17,15
110,00	5,20	13,29	0,70	9,30	18,20
115,00	5,50	13,31	0,70	9,32	19,25
120,00	6,00	13,34	0,70	9,34	21,00
125,00	6,50	13,32	0,65	8,66	22,75
130,00	6,90	13,34	0,65	8,67	24,15
135,00	7,10	13,33	0,65	8,66	24,85
140,00	7,50	13,31	0,64	8,52	26,25
145,00	7,80	13,45	0,64	8,61	27,30
150,00	8,30	13,36	0,62	8,28	29,05

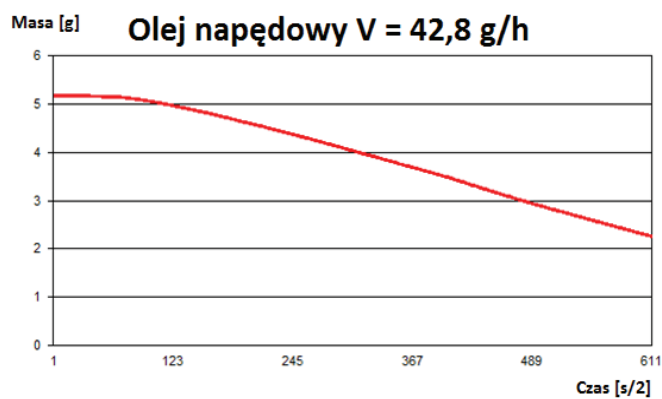
Wartości szybkości spalania wybranych, wygaszanych paliw podano na rys. 6–9.



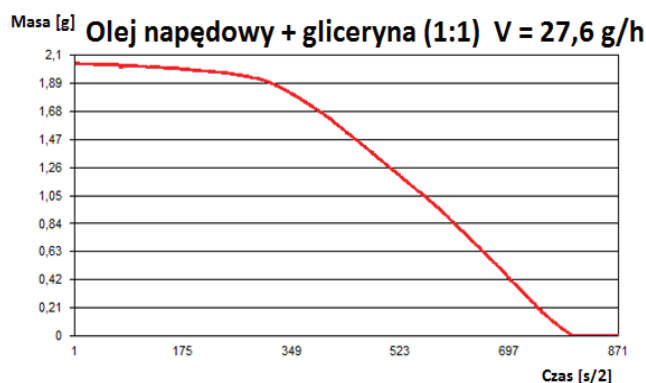
Rys. 6. Zależność ubytku masy w czasie podczas spalania parafiny



Rys. 7. Zależność ubytku masy w czasie podczas spalania benzyny



Rys. 8. Zależność ubytku masy w czasie podczas spalania oleju napędowego



Rys. 9. Zależność ubytku masy w czasie podczas spalania mieszanki oleju napędowego i gliceryny

Parametry fali wygaszającej płomień wybranych paliw podano w tabelach 2–5.

Tab. 2. Wartości krytyczne dla wygaszenia płomienia świecy parafinowej

Hz	U, V	I, A	U_s , mV	P, W	Pa, Pa	V_{pal} , g/h
30,00	10,50	0,36	0,30	3,78	1,05	3,00
40,00	12,28	0,40	0,90	4,91	3,15	
50,00	14,30	0,75	1,20	10,73	4,20	
60,00	17,80	1,05	1,60	18,69	5,60	
70,00	19,50	1,20	1,80	23,40	6,30	
80,00	25,90	1,60	2,60	41,44	9,10	
90,00	28,70	1,65	4,00	47,36	14,00	
100,00	30,00	1,65	4,30	49,50	15,05	

Tab. 3. Wartości krytyczne dla wygaszenia płomienia benzyny

Hz	U, V	I, A	U_s , mV	P, W	Pa, Pa	V_{pal} , g/h
40,00	33,50	1,90	4,50	63,65	15,75	67,70
40,00	31,00	1,70	4,00	52,70	14,00	
40,00	25,75	1,50	2,10	38,63	7,35	

Tab. 4. Wartości krytyczne dla wygaszenia płomienia oleju napędowego

Hz	U, V	I, A	U_s , mV	P, W	Pa, Pa	V_{pal} , g/h
40,00	14,30	0,60	1,90	8,58	6,65	42,80
40,00	15,90	0,65	2,20	10,34	7,70	
40,00	18,40	0,80	2,70	14,72	9,45	
50,00	25,50	1,50	2,10	38,25	7,35	
50,00	17,30	1,60	2,40	27,68	8,40	
50,00	17,00	1,60	2,40	27,20	8,40	

Tab. 5. Wartości krytyczne dla wygaszenia płomienia mieszanki oleju napędowego i gliceryny w stosunku 1:1

Hz	U, V	I, A	U _s , mV	P, W	Pa, Pa	V _{pal} , g/h
30,00	25,10	1,50	1,30	37,65	4,55	27,60
30,00	21,80	1,30	1,20	28,34	4,20	
40,00	13,67	0,55	1,40	7,52	4,90	
40,00	19,30	0,90	2,30	17,37	8,05	
50,00	27,60	1,60	2,70	44,16	9,45	
50,00	26,60	1,52	2,50	40,43	8,75	

Podsumowanie

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że jednym z kluczowych elementów charakteryzujących falę akustyczną, potrzebnych do wygaszenia płomienia jest nie tyle wielkość ciśnienia akustycznego zaburzającego ośrodek, co częstotliwość, z jaką ten ośrodek jest zaburzany. Częstotliwości niższe wygaszały płomień przy kilkunastokrotnie niższej mocy pracy głośnika, niż miało to miejsce w przypadku wysokich częstotliwości, dla których niejednokrotnie wygaszenie nie nastąpiło w ogóle. Metoda wygaszania płomienia za pomocą fal akustycznych nie może jak na razie być wykorzystywana do gaszenia pożaru na dużą skalę, jednak mogłaby ona znaleźć zastosowanie przy gaszeniu ognia w miejscach trudno dostępnych, tam gdzie płomień nie zdążyło się jeszcze rozprzestrzenić. Zautomatyzowany system antypożarowy bazujący na generowaniu fal akustycznych, składający się z czujników dymu i ciepła oraz odpowiednio skierowanych głośników niskotonowych, mógłby bez żadnych skutków ubocznych (takich jakie pozostawia po sobie woda lub piana), skutecznie i przede wszystkim szybko zapobiegać pożarom w punktach, gdzie ogień jest najmniej pożądany.

Literatura

- [1] Beisner E., Wiggins N.D., Yue K.-B., Rosales M., Penny J., Lockridge J., Page R., Smith A., Guerrero L., *Acoustic flame suppression mechanics in a microgravity environment*, [in:] *Microgravity Sci. Technol.*, Vol 27, 2015, p. 141–144, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12217-015-9422-4>.
- [2] Binbin W., Guangxuan L., *Experimental study on fire extinguishing of water mist with a newly prepared multi-component additive*, [in:] *Procedia Engineering*, Vol 62, 2013, p. 317–323.

- [3] Kordylewski W., *Spalanie i paliwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [4] Kowalewicz A., *Podstawy procesów spalania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [5] Li Z., Wang Q., *Experimental study of explosive water mist extinguishing fire*, [in:] *Procedia Engineering*, Vol 11, 2011, p. 258–267.
- [6] Nam K.K., Dong H.R., *A study on the fire extinguishing characteristics of deep-seated fires using the scale model experiment*, [in:] *Fire Safety Journal*, Vol 80, 2016, p. 38–45.
- [7] Sygut T., *Mgłą w ogień*, [w:] *Tygodnik Przegląd*, Nr. 39, 2004.
- [8] Szargut J., *Termodynamika*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1985.
- [9] Szkarowski A., *Spalanie gazów*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009.
- [10] Tanabe M., Yano T., Kuwahara T., *Numerical simulation on the flame propagation in acoustic fields*, [in:] *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, Vol 25, 2008, p. 371–374.
- [11] Węsierski T., Wilczkowski S., Radomiak H., *Wygaszanie procesu spalania przy pomocy fal akustycznych*, [w:] *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, Nr. 2, 2013, s. 59–64.
- [12] Yusuke K., Keita I., Hideo O., *Fire extinguishing properties of novel ferrocene/surfynol 465 dispersions*, [in:] *Fire Safety Journal*, Vol 72, 2015, p. 1–6.
- [13] Zambon A.C., Chelliah H.K., *Acoustic-wave interactions with counter-flow single- and twin-premixed flames: finite-rate kinetics, heat release and phase effects*, [in:] *Proc. Combust. Institute*, Vol 31, 2007, p. 1247–1255.
- [14] NFPA 2001 Standard for Clean Agent Fire Extinguishing Systems. 2015 Edition.
- [15] <http://scienceinpoland.pap.pl/en/news/news,16706,a-fog-system-device-factory-has-been-opened-in-suchedniow.html>, (data dostępu: 20.05.2016).
- [16] <http://www.digitaltrends.com/cool-tech/darpas-fire-suppression-system-extinguishes-flames-with-sound/>, (data dostępu: 20.05.2016).