

Janusz WANDRASZ

Michał PYKA

Instytut Techniki Ciepłej

ZASTOSOWANIE INŻEKTORA GAZOWEGO W PROCESACH UTYLIZACJI TERMICZNEJ ODPADÓW

Streszczenie. W pracy przeanalizowano możliwość zastosowania inżektora gazowego w procesach termicznego przerobu odpadów. Pokazano przykład obliczeń i wyniki badań pracy inżektora wentylacyjnego zastosowanego do odciążu spalin w instalacji spalania odpadów.

1. Wprowadzenie

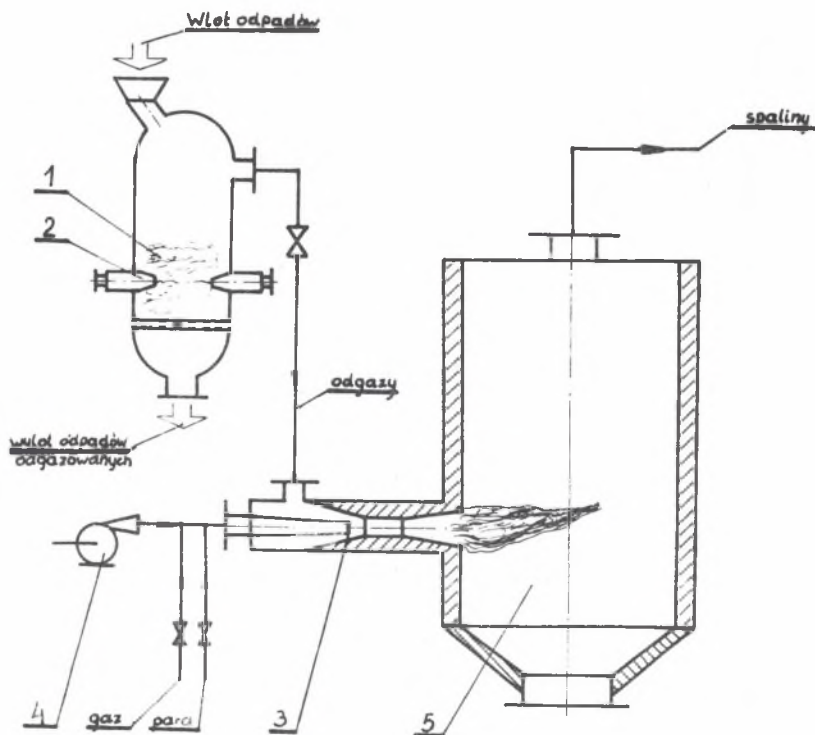
Termin "odpady", użyty w tytule pracy przyjęte zgodnie z powszechnym zwyczajem i tradycyjnym nazewnictwem, niezgodnie zaś z rolą i znaczeniem substancji zaliczonych powszechnie do "odpadów". Zagadnienie powyższe omówione szeregowe w pracy [8]. Pod pojęciem tym występować będzie substancja niewykorzystywana, będąca produktem ubocznym pochodzenia przemysłowego lub poza przemysłowego.

Kryzys surowcowy coraz częściej powoduje zwracanie uwagi na wykorzystanie substancji odpadowych, bądź przez bezpośrednie zawrócenie do obiegu, bądź w przypadku innych możliwości, przy posiadaniu eech surowca energetycznego, zastosowanie ich w procesach utylizacji termicznej. Zalicza się tutaj procesy odgazowania, zgazowania i spalania. W przypadku występowania w składzie tych substancji pierwiastków lub związków o charakterze agresywnym lub dających po obróbie termicznej takie substancje, procesy utylizacji termicznej wygodnie jest prowadzić w instalacjach e ciśnieniu niższym od atmosferycznego. Zapewnione jest w tym przypadku zmniejszenie emisji substancji toksycznych do otoczenia głównie w obrębie reaktora. W przypadku realizacji procesu spalania uzyskanie w komorze spalania podciśnienia wymaga zastosowania urządzenia powodującego odsysanie gazów. Zastosowanie wentylatora bywa często utrudnione zbyt wysoką temperaturą lub agresywnością spalin. W przypadkach tych, dogodnie jest zastosować inżektor gazowy lub gazowo-parowy, przy czym inżektory te mogą być wykonane z różnego rodzaju materiałów (np. ceramiczne) zapewniając tym samym niezawodność działania. W zależności od miejsca stosowania inżektora, czynnikiem napędowym może być powietrze podgrzane lub zimne a także para wodna.

W niniejszej pracy zaprezentowano kilka ze stosowanych w Zakładzie Urządzeń Chemicznych Energetycznego Wykorzystania Odpadów Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej sposobów stosowania iniektorów. Przedstawiono obliczenia projektowe, konstrukcję i wyniki badań iniektora typu wentylacyjnego stosowanego do odprowadzania spalin z komory pieca w półtechnicznej instalacji badawczej.

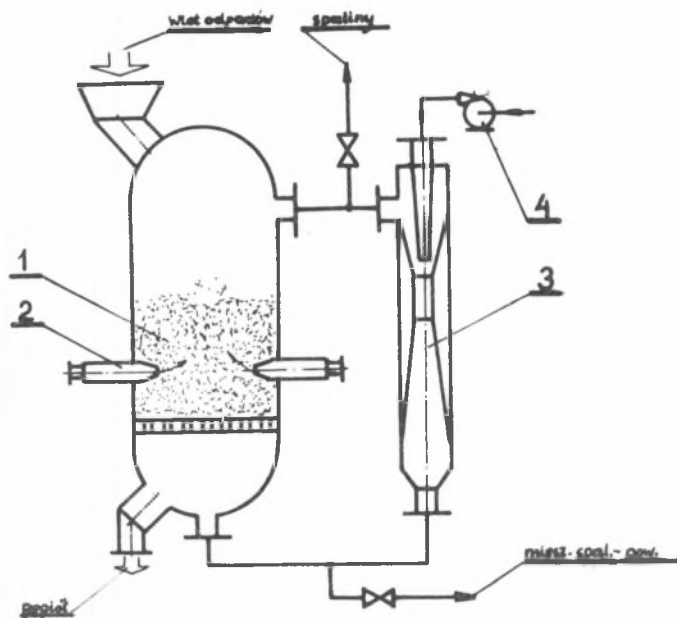
2. Schematy stosowania iniektorów

Iniektory gazowe w instalacjach utylizacji odpadów mogą mieć różnorodne zastosowania. Jednym z nich jest wykorzystanie ich do odciążenia gazów surowych w procesie odgazowania odpadów i podawanie do komory cyklonowej, w której następuje proces spalania gazów (rys. 1). Rozwiązania takie zasto-



Rys. 1. Zastosowanie iniektora do podawania odgazów do komory cyklonowej
1 - piec szybowy, 2 - palniki, 3 - iniektor, 4 - wentylator, 5 - komora cyklonowa

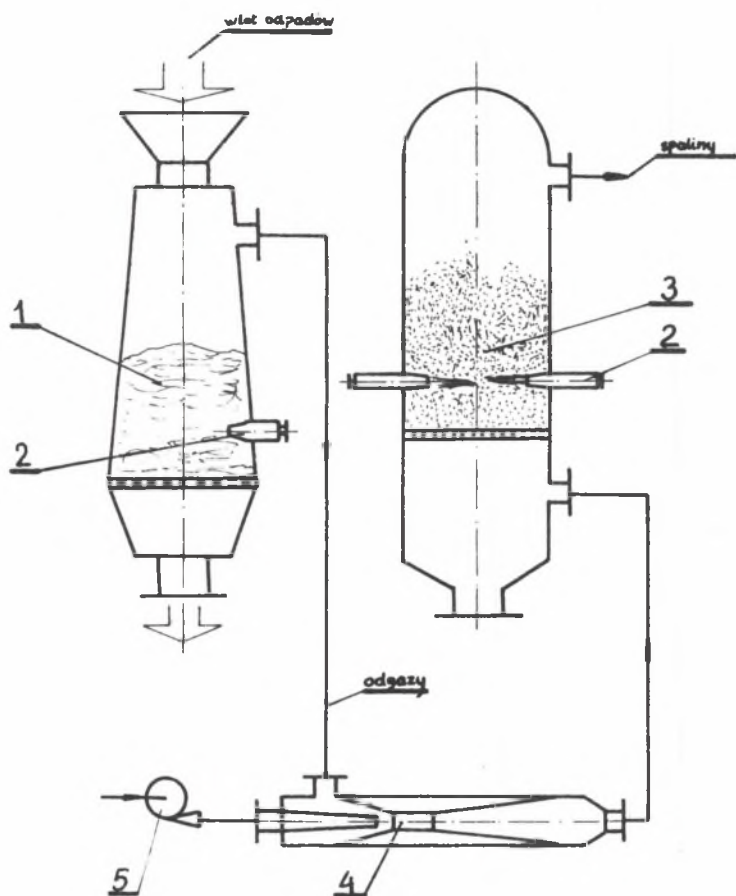
sowano w instalacji do utylizacji termicznej odpadów przemysłu elektronicznego [7], w której uzyskane z odgazowania gazy palne wraz z towarzyszącymi im toksycznymi substancjami ciekłymi i gazowymi wprowadzane są do komory spalania typu cyklonowego. Innym rozwiązaniem zaproponowanym w procesach ciśnieniowego spalania odpadów komunalnych jest zastosowanie inżektora, jako elementu zasysającego spaliny w układzie recyrkulacji spalin [6, 7] (rys. 2). Czynnikiem napędowym jest tutaj powietrze sprężone dopro-



Rys. 2. Zastosowanie inżektora w układzie z oszczędnością recyrkulacją spalin (odgazów)

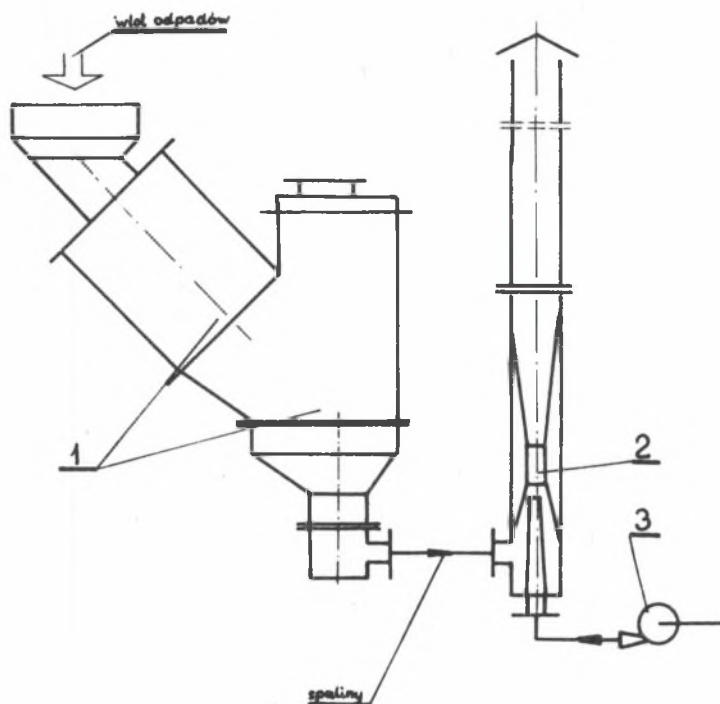
1 - piec, 2 - palniki, 3 - inżektor, 4 - wentylator

wadzone w ilości niezbędnej dla właściwego prowadzenia procesu spalania. Zasysa ono spaliny recyrkulujące, będące uzupełnieniem strumienia gazów przy realizacji procesu fluidyzacji. Podobne układy można stosować przy wprowadzaniu gazu palnego lub innych substancji gazowych do warstwy fluidalnej, w przypadku niskiego ciśnienia tych gazów i niemożności mechanicznego ich sprężania (rys. 3). Na rys. 4 przedstawiono zastosowanie inżektora gazowego w instalacji badawczej spalania odpadów stałych i pastowatych, o kierunku przepływu spalin wymagającym zastosowania układu odciągowego. Z uwagi na wysoką temperaturę spalin odpływających $523-943^{\circ}\text{K}$ (w zależności od obciążenia komory) oraz z braku odpowiedniego urządzenia me-



Rys. 3. Zastosowanie iniektora w układzie: piec szybowy - piec fluidalny
 1 - piec szybowy, 2 - palniki, 3 - piec fluidalny, 4 - iniektor, 5 - wentylator

ohanicznego, zastosowano iniektor zasilany powietrzem dostarczonym z wentylatora. Dla powyższego układu w dalszej części pracy pokazano sposób doboru iniektora typu wentylacyjnego (zwanego również strumienicą) [1] oraz wyniki badań przeprowadzone na gotowym obiekcie.



Rys. 4. Schemat instalacji doświadczalnej pieca do spalania odpadów stałych i pozostałości z wymuszonym obiegiem spalin

1 - strefy spalania, 2 - inżektor, 3 - wentylator

3. Obliczenia inżektora wentylacyjnego

Ponieważ obliczenia oparto na pracy [1], sposób przeprowadzenia obliczeń zawężony zostanie głównie do problemu przyjęcia założeń projektowych. Wzory i równania oraz ich uzasadnienie znajdzie czytelnik w cytowanej pracy [1]. Warunkiem doboru inżektora wentylacyjnego jest, aby różnica ciśnień czynników napędowego i zasysanego była mniejsza od wartości określonej zależnością (1):

$$\Delta p_n = p_n - p_s \leq 0,005 \text{ MPa} \quad (1)$$

gdzie: p_n i p_s to ciśnienia całkowite czynnika napędowego i zasysanego. W zagadnieniach praktycznych wielkość ta jest możliwa do określenia, przy czym występować mogą dodatkowe warunki wynikające z założeń prowadzenia

procesu. Należy do nich: zapewnienia odpowiedniej ilości czynnika zasysanego przy wymaganej wartości ciśnienia tłoczenia p_t . Warunki działania inżektora mogą być podane w postaci sumarycznej ilości czynnika tłoczonego i zasysanego przy zadanych wartościach ciśnień.

W rozważanym przykładzie wielkościami zadanymi warunkami pracy układu był strumień zasysanych spalin w ilości $\dot{V}_m = 48,94 \cdot 10^{-4}$ kmol/s, $\dot{V}_m \approx \approx 0,3$ m³/s przy podciśnieniu wynoszącym $\Delta p = -400$ Pa i nadciśnieniu mieszaniny w płaszczyźnie wylotu z dyfuzora ≈ 400 Pa.

Przyjmując zgodnie z sugestiami autorów [1] średnią wartość współczynnika sprawności dyfuzora $\eta_d = 0,75$ przy wartości wyróżnika strat strumieniowych ξ_m wynoszącego $\xi_m = 0,2$ ($\xi_m = 0,1 \div 0,9$, przy czym 0,1 odpowiada inżektorowi bardzo starannie wykonanemu, zaś 0,9 jest wartością skrajną) można obliczyć wartość wyróżnika strat strumieniowych

$$\xi = 2 + \xi_m - \eta_d \quad (2)$$

Wartość ξ dla rozpatrywanego przypadku wynosi $\xi = 1,45$. Korzystając z wykresu lub równań podanych przez autorów pracy [1] określić można warunki optymalnego działania inżektora. Optymalny stopień efektywności $\%_{opt}$ określa równanie

$$\%_{opt} = \frac{\dot{V}_s}{\dot{V}_m} = \sqrt{\frac{\xi_m}{\xi - 1}} \quad (3)$$

oraz optymalna sprawność inżektora η_m opt

$$\eta_m \text{ opt} = \frac{\%_{opt} - 1}{2 \cdot \%_{opt}} \quad (4)$$

Dla rozważanego przypadku wielkości powyższe przyjmują wartości $\%_{opt} = 1,8$ oraz $\eta_m = 0,22$.

Dalszy tok obliczeń przedstawiono w tabeli 1, a na rys. 5 zamieszczono schematyczny rysunek inżektora.

Tabela 1

Dane projektowe i wyniki obliczeń inżektora wentylacyjnego powietrze - spaliny w oparciu o [1]

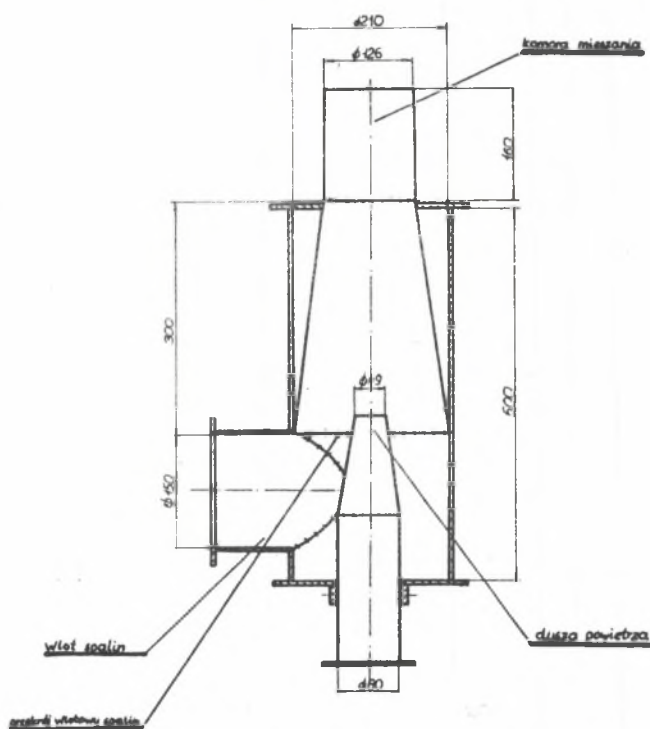
Lp.	Wielkość	Jednostka	Wartość	
			założona	obliczona
1	2	3	4	5
1	Strumień odpadów (średni)	kg/s	0,0167	-
2	Analiza elementarna odpadów			
	o	kg/kg	0,4142	-
	h	kg/kg	0,0684	-

od. tabeli 1

1	2	3	4	5
	o	kg/kg	0,4981	-
	n	kg/kg	0,0066	-
	p	kg/kg	0,0094	-
3	Strumień gazu palnego	kmol/s	$1,7 \cdot 10^{-4}$	-
4	Analiza elementarna gazu			
	CO	kmol/kmol	0,125	-
	CO ₂	kmol/kmol	0,045	-
	H ₂	kmol/kmol	0,518	-
	CH ₄	kmol/kmol	0,248	-
	O ₂	kmol/kmol	0,005	-
	N ₂	kmol/kmol	0,059	-
5	Skład spalin ($\lambda = 1,2$)			
	(CO ₂)	%		13,23
	(N ₂)	%		68,55
	(O ₂)	%		3,03
	(H ₂ O)	%		15,19
6	Strumień spalin wilgotnych	kmol/s	-	$48,94 \cdot 10^{-4}$
7	Temperatura spalin	K	800	-
8	Gęstość spalin	kg/m ³	-	0,432
9	Strumień powietrza ssącego	kmol/s	-	$73,64 \cdot 10^{-4}$
10	Temperatura powietrza	K	298	-
11	Gęstość powietrza	kg/m ³	-	1,18
12	Optymalne prędkości			
	- przekrój dolotowy ssący (C _{SO}) _{opt}	m/s	-	33,2
	- przekrój komory mieszania (C ₃) _{opt}	m/s	-	40,8
	- przekrój wylotowy dyszy powietrza (C _{CO}) _{opt}	m/s	-	99,0
13	Temperatura roztworu w komorze mieszania	K	-	503
14	Gęstość roztworu spaliny			
	- powietrze w komorze mieszania	kg/m ³	-	0,694

od. tabeli 1

1	2	3	4	5
15	Przekrój wlotowy spalin powierzchnia średnica pier- ścienia zew- nętrznego	m ² m	- -	9,80 · 10 ⁻³ 0,137
16	Komora mieszania przekrój średnica	m ² m	- -	1,25 · 10 ⁻² 0,126
17	Dysza powietrzna przekrój średnica	m ² m	- -	1,83 · 10 ⁻³ 0,048
18	Część stożkowa kąt zbieżności długość	o m	- -	14,3 0,3
19	Komora mieszania długość	m	-	0,16



Rys. 5. Szkic wymiarowy strumienicy doświadczalnej

4. Wyniki badań

Zaprojektowany i wykonany inżektor wentylacyjny zastosowano w instalacji spalania odpadów stałych jako urządzenie odciągowe spalin z komory pieca. Dla stałej wartości strumienia powietrza podawanego przez wentylator dla zasilania inżektora, mierzono temperaturę spalin na dolocie do układu oraz temperaturę roztworu spaliny - powietrze. Podciśnienie wytwarzane inżektorem w komorze pieca powodowało dosysanie powietrza do procesu spalania. Mierząc skład spalin suchych odpływających z komory przy znanym składzie elementarnym spalanych odpadów i gazu, z równań bilansu pierwiastków dla spalania niecałkowitego i niezupełnego [4] wyznaczyć można strumień spalin płynących z komory, strumień łączny powietrza doprowadzonego do spalania oraz zawilżenie spalin. Z uwagi na nadmiar informacji (trzy niewiadome, cztery równania bilansu substancji) wyniki pomiarów podawano korekcie [5] uzyskując po obliczeniach wartości podane w tabeli 2. Ilość odsysanych spalin spełniać musi równanie bilansu energii dla inżektora w postaci:

$$\dot{n}_s \Delta(Mi)_s \left| \begin{matrix} T_s \\ T_o \end{matrix} \right. + \dot{n}_{a,s} \Delta(Mi)_a \left| \begin{matrix} T_a \\ T_o \end{matrix} \right. = \dot{n}_s \Delta(Mi)_s \left| \begin{matrix} T_m \\ T_o \end{matrix} \right. + \dot{n}_{a,s} \Delta(Mi)_a \left| \begin{matrix} T_m \\ T_o \end{matrix} \right. + \dot{Q}_{ot} \quad (5)$$

gdzie:

\dot{n}_s - strumień spalin, kmol/s,

$\dot{n}_{a,s}$ - strumień powietrza zasysającego, kmol/s,

$\Delta(Mi)$ - przyrost entalpii, kJ/kmol,

T_s, T_a, T_m - temperatura spalin, powietrza, roztworu spaliny - powietrze, K,

T_o - temperatura odniesienia, 298 K,

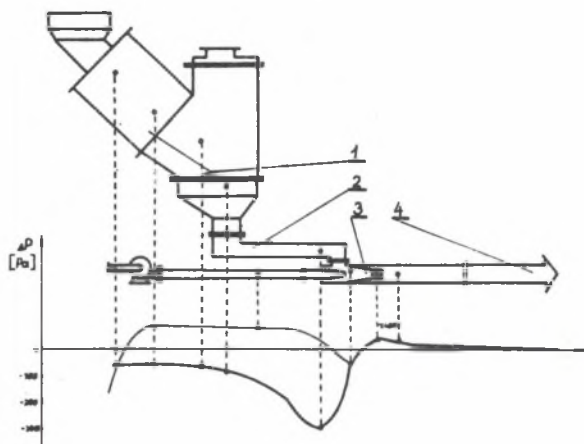
\dot{Q}_{ot} - straty ciepła do otoczenia, kW.

Przeprowadzone pomiary temperatury ścianki inżektora (rura zewnętrzna o średnicy 0,220 m i długości 0,5 m) oraz obliczenia strat ciepła przez konwekcję swobodną [2] pozwoliły na pominięcie tej wielkości w rozważaniach. Uzyskane wartości \dot{Q}_{str} wynosiły maksymalnie do 0,1 kW przy strumieniach energii rzędu ~ 100 kW. Uproszczona postać równania (5) stanowiła dodatkową korektę poprawności obliczeń i pomiarów, przy czym zgodność wyników mieściła się w granicach $\sim \pm 1\%$. Rozkład ciśnień w instalacji spalania odpadów zamieszczono na rys. 6.

Tabela 2

Zestawienie uśrednionych wyników pomiarów i obliczeń

Lp.	Wielkość	Jed- nostka	16,4 · 10 ⁻³		17,9 · 10 ⁻³		24,0 · 10 ⁻³	
			zmiarzona	obliczona	zmiarzona	obliczona	zmiarzona	obliczona
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Strumień powietrza ssącego	kmol/s	8,87 · 10 ⁻³	-	8,87 · 10 ⁻³	-	8,87 · 10 ⁻³	-
2	Skład spalin suchych	[CO ₂]	10,8	-	12,8	-	13,5	-
		[CO]	3,0	-	2,8	-	3,3	-
		[O ₂]	5,7	-	4,0	-	1,0	-
		[N ₂]	-	80,5	-	80,4	-	82,2
	X _Z	kmol H ₂ O	-	0,2176	-	0,2065	-	0,2063
		kmol sp.s	-	5,624 · 10 ⁻³	-	5,292 · 10 ⁻³	-	5,328 · 10 ⁻³
3	Strumień spalin wilgotnych	kmol/s	-	5,624 · 10 ⁻³	-	5,292 · 10 ⁻³	-	5,328 · 10 ⁻³
4	Strumień powietrza do spalania	kmol/s	-	4,689 · 10 ⁻³	-	4,470 · 10 ⁻³	-	4,377 · 10 ⁻³
5	Stosunek nadmiaru powietrza λ	-	-	1,35	-	1,20	-	0,90
6	Temperatura spalin T _s	K	-	743	-	853	-	933
7	Temperatura powietrza T _a	K	-	297	-	297	-	298
8	Temperatura roztworu T _m	K	-	483	-	523	-	563
9	Stopień efektywności η	%	-	1,56	-	1,69	-	1,86



Rys. 6. Rozkład ciśnień w instalacji doświadczalnej
1 - strefy spalania, 2 - kanał spalinowy, 3 - inżektor, 4 - komin

5. Wnioski

Przeprowadzone badania w całej rozciągłości potwierdziły przydatność inżektora wentylacyjnego (strumieniowy) w zastosowaniu do procesów spalania substancji odpadowych. Obliczenia projektowe przedstawione w tabeli 1 w sposób zadowalający odpowiadają wynikom pomiarowym. Założony stopień efektywności uzyskano przy nieco większych od założonych wydajnościach spalania odpadów stałych. Było to uwarunkowane zastosowaniem typowych średnic rur, zbliżonych wymiarami do wynikających z projektu. Zastosowanie inżektora jako urządzenia odciągowego w miejsce wentylatora, którego praca przy podanych parametrach spalin byłaby problematyczna, spełniła swoje zadanie. Wykazano ponadto całkowitą przydatność metodyki obliczeń zaprezentowanej w pracy [1] do projektowania inżektorów gazowych.

Przeprowadzone badania procesu spalania w komorze pozwoliły, dla zastosowanego typu inżektora, ustalić maksymalną wydajność procesu spalania. Wyniki te, jakkolwiek w omawianym problemie odgrywają podrzędną rolę, wskazują na powiązanie obu elementów układu.

W pracy nie przedstawiono metod obliczeniowych, podając jedynie wyniki obliczeń. Metody te z uwagi na podaną literaturę uznano za trywialne i nie wnoszące istotnych informacji. Uwagę skoncentrowano na doborze współczynników, sprawności oraz na adekwatności rozwiązania i możliwości jego upowszechnienia.

LITERATURA

1. Goliński J.A., Trokoleński A.T.: Strumienie - teoria i konstrukcja. WNT, Warszawa 1979.
2. Kostowski E. i inni: Zbiór zadań z przepływu ciepła. Skrypt Politechniki Śląskiej Nr 1102, Gliwice 1983.
3. Sokołow J.J., Zinger N.M.: Strumienie. WNT, Warszawa 1965.
4. Szargut J.: Termodynamika. PWN, Warszawa 1974.
5. Szargut J. i inni: Zbiór zadań z gospodarki cieplnej. Skrypt Politechniki Śląskiej Nr 1020, Gliwice 1981.
6. Wandrasz J.: Materiały 2nd International Symposium Materials and Energy from Refuse. Antwerpia 1981.
7. Wandrasz J. i inni: Wykonanie w skali technicznej i wdrożenie urządzenia do utylizacji odpadów palnych. Praca naukowo-badawcza. Maszynopis dostępny w ITC Politechniki Śląskiej, 1983.
8. Wandrasz J., Zieliński J.: Procesy fluidalne utylizacji odpadów. Ossolineum Wrocław. Tom I, 1983, Tom II, 1984 (w druku).

Recenzent: prof. dr hab. inż. Edward Kempa

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 1983 r.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВОГО ИНЖЕКТОРА В ПРОЦЕССАХ
ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ

Р е з ю м е

В работе дан анализ возможности применения газового инжектора в процессах термической утилизации отходов. Показан пример расчётов, и представлены результаты исследований работы вентиляционного инжектора, применяемого к отсасыванию газов в устройствах сжигания отходов.

APPLICATION OF A GAS-INJECTOR IN THERMAL WASTE
UTILIZATION PROCESSES

S u m m a r y

The paper presents an analysis of a gas-injector application possibility in processes of thermal waste utilization. An example of design calculations is presented and of activities of ventilating injector applied as a combustion gases sucking-away unit in a waste combustion installation are discussed.