

## Grzegorz WÓLKOWYCKI

e-mail: g.wolkowycki@doktoranci.pb.edu.pl

Zakład Techniki Ciepłej i Chłodziwa, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, Białystok

## Doświadczalne wyznaczanie efektywności wysokotemperaturowych regeneratorów z nieruchomym wypełnieniem ceramicznym o innowacyjnej geometrii

## Wstęp

Komory regeneracyjne do odzysku ciepła odpadowego z przestrzeni roboczych urządzeń przemysłowych takich jak: piece, kotły, spalinowe silniki turbinowe obejmują dużą grupę wymienników ciepła, których cechą charakterystyczną jest przekazywanie ciepła od jednego nośnika energii do drugiego za pośrednictwem nieruchomego wypełnienia. Wypełnienie stanowią ceramiczne cegły bądź kształtki o różnego rodzaju kształtkach.

W niniejszej pracy przedstawiono budowę regeneratorów do odzysku ciepła odpadowego pracujących integralnie z piecem szklarskim zmianowym typu martenowskiego w *Biaglass Huta Szkła Białystok*. Konstrukcja komór składa się z wypełnienia ceramicznego o innowacyjnym kształcie geometrii, dotychczas niestosowanego w przemyśle.

Celem pracy jest również przedstawienie wyników eksperymentalnych pozyskanych podczas normalnej eksploatacji całego układu. Na podstawie procedury podanej w niniejszej pracy, a także uzyskanych danych doświadczalnych: temperatur, czasów poszczególnych cykli pracy oraz wyznaczonych strumieni pojemności cieplnych określono efektywność regeneratorów. Podano efektywność regeneratorów zarówno w cyklu jego grzania, jak i chłodzenia. Z uwagi na typowo doświadczalny charakter pracy wskazano niepewności pomiarowe parametrów mierzonych jak i wynikowej efektywności.

Przedstawione wyniki badań efektywności pracującego obiektu rzeczywistego w skali 1:1 są unikalne i dotychczas nie opisane w literaturze.

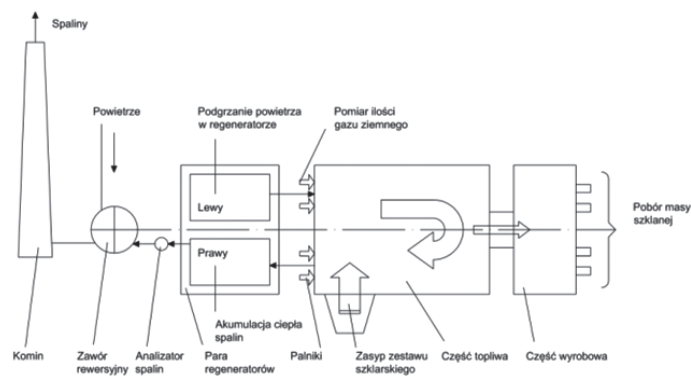
## Budowa pieca szklarskiego oraz komór regeneracyjnych

W *Biaglass* w Białymstoku pracuje piec szklarski zmianowy typu martenowskiego o pracy ciągłej. Podczas doby jest wytapiane około 6 ton masy szklanej do produkcji kloszów oświetleniowych.

## Piec szklarski

Piec szklarski składa się z części topliwnej (topienie masy szklanej z zestawu szklarskiego), wyrobowej (pobór półproduktu do formowania wyrobów), przepustu (przepływ z części topliwnej do wyrobowej), zasypnika (zasyp zestawu szklarskiego do topienia), palników gazowych (dostarczanie gazu ziemnego GZ50 jako paliwa), oraz komór regeneracyjnych (dwie komory o identycznych kształtach i parametrach do odzysku ciepła odpadowego).

Na rys. 1 przedstawiono schemat układu przepływowego powietrza i gazów spalinowych podczas pracy całego układu.



Rys. 1. Schemat układu przepływowego pieca szklarskiego

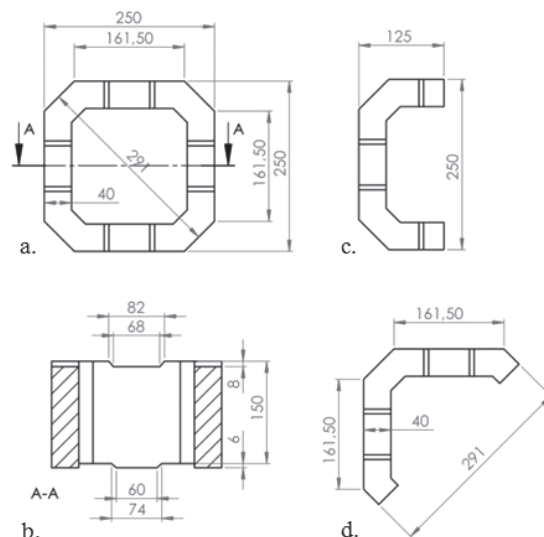
## Komory regeneracyjne

Ciągłość działania pieca szklarskiego zawsze wymaga wyposażenia go w dwa regeneratory (prawy i lewy), które są usytuowane bezpośrednio za częścią topliwą pieca szklarskiego. Komory pracują w sposób okresowy i cykliczny. Gdy jeden regenerator nagrzewa się (cykl grzania) czyli akumuluje ciepło odprowadzane od spalin, drugi jest studzony (cykl chłodzenia) oddając zakumulowane ciepło do powietrza doprowadzonego do spalania. Po okresie 30 minut (w przypadku *Huty Szkła Białystok*) następuje zmiana kierunku (rewersja) przepływu powietrza i spalin. Regenerator, który poprzednio akumulował ciepło tym razem je oddaje (cykl chłodzenia), natomiast drugi oddający ciepło – tym razem je akumuluje (cykl grzania).

## Innowacyjne wypełnienie regeneratora

Komory regeneracyjne składają się z wypełnienia w formie kształtek o innowacyjnej geometrii. Nowością zastosowanego wypełnienia są jego znacznie cieńsze ścianki w porównaniu do tradycyjnie stosowanego kształtu (zamkniętego prostokąta), co skutkuje mniejszym ich przegrzewaniem się i prowadzi do lepszych warunków odzysku ciepła odpadowego. Ponadto zastosowany kształt wypełnienia posiada zalety użytkowe i eksploatacyjne, jak łatwość czyszczenia, duża odporność na korozję i zatykanie się.

Rys. 2a-d ukazują przekroje pojedynczych kształtek zastosowanych do budowy wypełnienia komór regeneratorów pracujących w omawianym zakładzie.

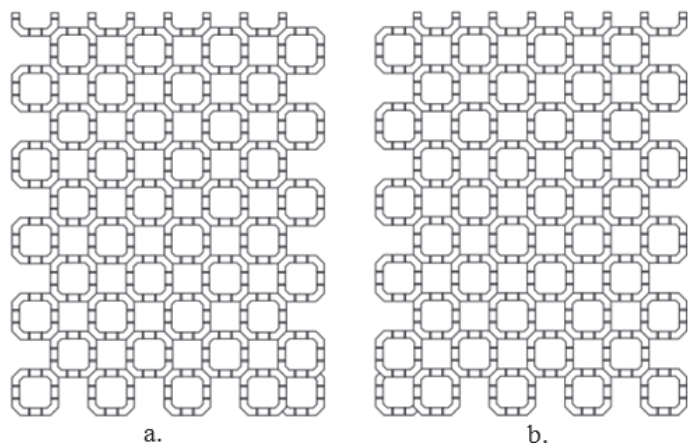
Rys. 2. Kształtki wypełnienia regeneratora: a) HS170, b) przekrój HS170, c)  $\frac{1}{2}$  HS170, d)  $\frac{1}{8}$  HS170

Jedna warstwa wypełnienia regeneratora składa się z 41 kształtek HS170, 1 kształtki  $\frac{4}{8}$  HS170 oraz 4 kształtek  $\frac{1}{2}$  HS170. Sposób usytuowania poszczególnych prostek zaprezentowano na rys. 3.

Wypełnienie regeneratora jest zbudowane z 29 warstw cegieł luźno ułożonych na siebie tak aby jedna opierała się na drugiej tworząc swobodny przepływ gazów spalinowych i powietrza podczas pracy.

Poszczególne warstwy różnią się pod względem składu chemicznego, od którego zależy odporność na oddziaływanie wysokiej temperatury gazów przepływających przez regenerator. W strefie najwyższych

temperatur jest 5 warstw kształtek magnezytowych *Glasmag M98*, niżej zastosowano 5 warstw również magnezytowych *Glasmag M96* o bardzo zbliżonych właściwościach termicznych do poprzednich. Niżej do budowy kolejnych 10 warstw użyto cegły krzemianowe *Silimax KA*, zaś przy najniższej panujących warunkach temperaturowych znajduje się 9 warstw także krzemianowych *Silimax KAB*.



Rys. 3. Układ ułożenia kształtek wypełnienia regeneratora: a) lewego, b) prawego

W tab. 1 zaprezentowano właściwości termiczne poszczególnych warstw materiałów. Dane w zestawieniu pochodzą z kart produktowych producentów materiałów: *Zakładów Magnezytowych Ropczyce S.A.* oraz *Vesuvius Poland Sp. z o.o.*

Tab. 1. Właściwości termiczne wypełnienia regeneratora

Lp.	Materiał	M98	M96	KA	KAB	
1	Gęstość masy, kg/m <sup>3</sup>	2920	2900	2530	2470	
2	Ciepło właściwe, kJ/kg·K	25°C	-	-	0,761	0,762
		200°C	-	-	0,991	0,992
		400°C	1,08	1,08	-	-
		500°C	-	-	1,141	1,142
		600°C	1,18	1,18	-	-
		800°C	1,26	1,26	-	-
		1000°C	1,31	1,31	-	-
3	Przewodność cieplna, W/m·K	200°C	-	-	2,41	2,23
		400°C	4,48	4,48	2,26	2,08
		600°C	3,48	3,48	2,22	2,04
		800°C	2,72	2,72	2,24	2,07
		1000°C	2,32	2,32	2,30	2,15
		1200°C	2,24	2,24	-	-

### Oprzędkowanie pomiarowe pieca szklarskiego i komór regeneracyjnych

Do pomiaru temperatur gazów spalinowych oraz powietrza w komorach regeneracyjnych zastosowano termoelementy oraz termometr laboratoryjny. Pomiar wysokich temperatur odbywał się za pomocą termopar głowicowych prostych z osłonami ceramicznymi 1XPtRh-Pt / S (góra) i NiCr-NiAl / K (dół) o średnicy rury ochronnej 15 milimetrów bez izolacji wewnętrznej. Maksymalna temperatura stosowania wynosi 1450°C, zaś błąd pomiarowy wynosi ±0,0075|t|. W dolnej części komory temperaturę powietrza zewnętrznego do regeneratora mierzy się termometrem rtęciowym o zakresie -30÷40°C i błędzie pomiarowym ±0,2|t|. Natężenie przepływu gazu ziemnego GZ50 dostarczanego do spalania mierzone jest przepływomierzem *Yokogawa DY050* o zakresie pomiarowym 0÷250 Nm<sup>3</sup>/h, który posiada błąd pomiarowy ±1%.

## Doświadczalne wyznaczanie efektywności regeneratora

### Procedura obliczeniowa

Scałkowane równania bilansowe regeneratora dostarczają rozwiązań w postaci pól temperatur gazów i wypełnień. Ze względów aplikacyjnych istotna jest wielkość wymienianego strumienia ciepła. Obliczenia strumienia ciepła w regeneratorach opiera się na pojęciu efektywności wymiany ciepła wymiennika, nazywanej efektywnością regeneratora [Skiętko, 1998]. Jest ona zdefiniowana jako stosunek ilości ciepła  $Q$  wymienianego w regeneratorze podczas cyklu obliczanego na podstawie wyznaczonych temperatur gazów, do ilości ciepła  $Q_{max}$ , która byłaby wymieniana przy tych samych wlotowych właściwościach czynników wymieniających ciepło w rekuperatorze przeciwpądowym z wbudowaną nieskończenie wielką powierzchnią wymiany ciepła.

Ilość ciepła wymienionego w okresie grzania w przedziale czasu  $\tau_1$  dla regularnie periodycznego stanu pracy jest zbilansowana równoważną ilością ciepła przeniesionego w okresie chłodzenia regeneratora w przedziale czasu  $\tau_2$ . Dla regularnie periodycznego stanu pracy ilość ciepła wymienionego w okresie grzania jest zbilansowana równoważną ilością ciepła przeniesionego w okresie chłodzenia regeneratora, zatem

$$Q = (\dot{W}_1 \tau_1)(\bar{t}_1 - \bar{t}_2) = (\dot{W}_2 \tau_2)(\bar{t}_2 - \bar{t}_1) \quad (1)$$

natomiast ilość ciepła  $Q_{max}$  wynosi

$$Q_{max} = (\dot{W}\tau)_{min}(\bar{t}_1 - \bar{t}_2) \quad (2)$$

gdzie:

$(\dot{W}\tau)_{min} = \min[\dot{W}_1 \tau_1, \dot{W}_2 \tau_2]$  dla rozważanego przypadku,

$\dot{W}$  – strumień pojemności cieplnej, [W/K]

$\bar{t}$  – średnia temp. wlotowa gazów spalinowych/powietrza, [°C]

$\bar{t}$  – średnia temp. wylotowa gazów spalinowych/powietrza, [°C]

$\tau$  – czas trwania cyklu, [s]

1 – cykl grzania chłodzenia

2 – cykl chłodzenia

Strumień pojemności cieplnej  $\dot{W}$  jest wyznaczany z iloczynu strumienia masowego  $\dot{m}$  płynu (grzania – spalin, chłodzenia – powietrza) omywającego regenerators i średniego ciepła właściwego  $\bar{c}_p$  (grzania – spalin, chłodzenia – powietrza) zatem

$$\dot{W} = \dot{m}\bar{c}_p \quad (3)$$

Efektywność regeneratora wyznacza się na podstawie następującej zależności dla cyklu grzania [Skiętko i Shah, 2005]:

$$\varepsilon_1 = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{(\dot{W}_1 \tau_1)(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)}{(\dot{W}\tau)_{min}(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)} \quad (4)$$

i cyklu chłodzenia:

$$\varepsilon_2 = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{(\dot{W}_2 \tau_2)(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}{(\dot{W}\tau)_{min}(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)} \quad (5)$$

gdzie:

$\varepsilon$  – efektywność regeneratora

Jednak zazwyczaj występuje następująca zależność [Skiętko, 1998]:

$$\dot{W}_1 \tau_1 > \dot{W}_2 \tau_2 \quad (6)$$

co skutkuje tym, że

$$(\dot{W}\tau)_{min} = \dot{W}_2 \tau_2 \quad (7)$$

zatem efektywność w cyklu chłodzenia z równ. (5) po uwzględnieniu zależności (6)-(7) obliczyć można ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)}{(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)} \quad (8)$$

### Analiza niepewności wyznaczanej efektywności

Niepewność wyznaczonej efektywności określono stosując metodologię podaną przez Moffata [1988].

Błąd efektywności z cyklu grzania (4) przyjmuje postać:

$$\Delta \varepsilon_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta \varepsilon_1}{\partial \dot{t}_1} \Delta \dot{t}_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \varepsilon_1}{\partial \dot{t}_2} \Delta \dot{t}_2\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \varepsilon_1}{\partial \dot{r}_2} \Delta \dot{r}_2\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \varepsilon_1}{\partial \dot{m}_1} \Delta \dot{m}_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \varepsilon_1}{\partial \dot{m}_2} \Delta \dot{m}_2\right)^2} \quad (9)$$

przy założeniu, iż błędy średniego ciepła właściwego  $\bar{c}_p$  (gazów spalinyowych i powietrza) i czasu trwania okresu ( $\tau$ ) są pomijalnie małe.

Zatem wartość efektywności dla cyklu grzania wynosi:

$$\varepsilon_1 \pm \Delta \varepsilon_1 \quad (10)$$

Natomiast błąd efektywności cyklu chłodzenia (8) oblicza się z następującej zależności [Wolkowyci, 2011]:

$$\Delta \varepsilon_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta \varepsilon_2}{\partial \dot{t}_1} \Delta \dot{t}_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \varepsilon_2}{\partial \dot{t}_2} \Delta \dot{t}_2\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \varepsilon_2}{\partial \dot{r}_2} \Delta \dot{r}_2\right)^2} \quad (11)$$

Po uwzględnieniu równ. (11) wartość efektywności dla cyklu chłodzenia wynosi:

$$\varepsilon_2 \pm \Delta \varepsilon_2 \quad (12)$$

### Wyniki badań doświadczalnych efektywności regeneratorów

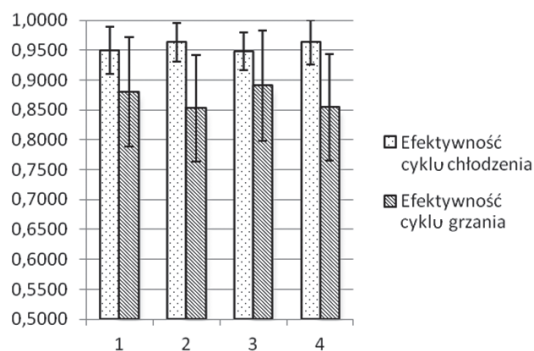
Wyniki otrzymano podczas badań doświadczalnych w *Hucie Szkła Białystok*, przeprowadzonych na dwóch pracujących niezależnych obiektach, których budowa i gabaryty były identyczne. Podczas doświadczenia następował wytop i pobór masy szklanej w ilości 210÷250 kg/h.

W tab. 2 zaprezentowano wartości efektywności regeneratorów wraz z ich niepewnościami pomiarowymi obliczonymi na podstawie uprzednio przedstawionych zależności. Zestawienie zawiera wartości temperatur wlotowych, wylotowych, zarówno z cyklu grzania jak i chłodzenia, a także rzeczywistych przepływów gazu ziemnego. Uwzględniono również przepływ masy powietrza (dla cyklu chłodzenia), a także spalin (cykl grzania) omywających regenerator. Wszystkie dane tabelaryczne uwzględniają niepewności pomiarowe.

Tab. 2. Efektywność badanych regeneratorów wyznaczona doświadczalnie

Lp.	Cykl	Regenera-tor	Przepływ gazu ziemnego GZ50 ± błąd, Nm <sup>3</sup> /s	Śr. temp. spal./ pow. góra / dół ± błąd, °C	Masowe natężenie przepływu spal./ pow. ± błąd, kg/s	Efektywność ± błąd
1.	chłodzenie	lewy	0,0364 ± 3,64·10 <sup>-4</sup>	1172 ± 27,4 19,5 ± 9,6	0,518 ± 7,48·10 <sup>-3</sup>	0,9502 ± 0,0390
	grzanie	lewy	0,0364 ± 3,64·10 <sup>-4</sup>	1236 ± 28,9 303 ± 26,1	0,548 ± 5,43·10 <sup>-2</sup>	0,8802 ± 0,0921
2.	chłodzenie	prawy	0,0364 ± 3,64·10 <sup>-4</sup>	1191 ± 26,8 20 ± 9,6	0,518 ± 7,49·10 <sup>-3</sup>	0,9632 ± 0,0318
	grzanie	prawy	0,0364 ± 3,64·10 <sup>-4</sup>	1232 ± 28,4 340 ± 26,1	0,552 ± 5,44·10 <sup>-2</sup>	0,8532 ± 0,0891
3.	chłodzenie	lewy	0,0364 ± 3,64·10 <sup>-4</sup>	1170 ± 27,4 20,5 ± 9,7	0,518 ± 7,49·10 <sup>-3</sup>	0,948 ± 0,0317
	grzanie	lewy	0,0364 ± 3,64·10 <sup>-4</sup>	1236 ± 28,9 300 ± 26,1	0,552 ± 5,44·10 <sup>-2</sup>	0,891 ± 0,0926
4.	chłodzenie	prawy	0,0364 ± 3,64·10 <sup>-4</sup>	1191 ± 26,8 21,2 ± 9,8	0,519 ± 7,49·10 <sup>-3</sup>	0,9629 ± 0,0367
	grzanie	prawy	0,0364 ± 3,64·10 <sup>-4</sup>	1232 ± 28,4 338 ± 26,1	0,552 ± 5,44·10 <sup>-2</sup>	0,8549 ± 0,0892

Na rys. 4 przedstawiono wykresy efektywności regeneratorów zarówno w cyklu grzania jak i chłodzenia uwzględniając niepewności.



Rys. 4. Efektywności doświadczalne regeneratorów

Zauważono wyraźną rozbieżność między wartościami efektywności cyklu grzania i cyklu chłodzenia.

Efektywność cyklu grzania jest we wszystkich badaniach mniejsza od cyklu chłodzenia, a różnica waha się od 0,05 do 0,11.

Również błędy pomiarowe są różne – przy cyklu grzania błąd jest prawie trzy razy większy niż przy chłodzeniu. Jest to zrozumiałe, ponieważ do wyznaczenia efektywności w cyklu grzania wykorzystuje się więcej zmiennych.

### Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono efektywność regeneratorów o nieruchomym wypełnieniu z kształtkami o innowacyjnej geometrii pracujących integralnie z piecem do wytopu masy szklanej ustalonej doświadczalnie przy użyciu danych uzyskanych z cyklu chłodzenia i cyklu grzania.

Wartości efektywności wahają się między ok. 0,85÷0,96 w zależności od cyklu. We wszystkich przypadkach efektywność cyklu grzania jest mniejsza od efektywności cyklu chłodzenia. Może to być spowodowane wieloma czynnikami, m.in.: niewłaściwym doбором materiałów użytych do budowy wypełnienia regeneratorów, niewłaściwym doбором konstrukcji, bądź złym oszacowaniem czasu cyklu pracy każdego z regeneratorów. Niemniej jednak należy podkreślić, iż są to urządzenia bardzo efektywne i niewątpliwie w znacznym stopniu usprawniają proces spalania paliw gazowych.

Szacowany błąd efektywności określony dla okresu grzania wynosi ok. ±0,089÷0,093. Z drugiej strony, w przypadku cyklu chłodzenia jest on mniejszy i wynosi ok. ±0,03. Przy wyznaczaniu efektywności w cyklu grzania jest bowiem brany pod uwagę strumień pojemności cieplnej gazów omywających wypełnienie regeneratora, a zatem jest więcej zmiennych.

Warto zwrócić uwagę, że regeneratory są konstruowane z elementów ceramiki ogniotrwalej o różnych właściwościach wzdłuż wysokości regeneratora, zależnie od warunków temperaturowych. Z kolei własności termiczne wypełnienia regeneratora mogą zmieniać się znacznie pod wpływem temperatury strumienia gazu je omywającego. W konsekwencji teoretyczne modelowanie procesów wymiany ciepła w regeneratorach na podstawie parametrów gazu i właściwości wypełnienia regeneratorów może powodować mniejszą dokładność końcowych wyników.

### LITERATURA

- Moffat R.J., 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **1**, 3-17. DOI: 10.1016/0894-1777(88)90043-X
- Skiepko T., Shah R.K., 2005. Modeling and effect of leakages on heat transfer performance of fixed matrix regenerators. *Int. J. Heat Mass Trans.*, **48**, 1608-32. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.023
- Skiepko T., 1998. *Teoria wymienników z wypełnieniem*. Dodatek F [w:] Madejski J.: Teoria wymiany ciepła. Wyd. Pol. Szczecińskiej, Szczecin, wyd. II
- Wolkowyci G., 2011. Doświadczalne wyznaczanie efektywności regeneratora o nieruchomym wypełnieniu na podstawie parametrów eksploatacyjnych regeneratora pieca szklarskiego. *Acta Mechanica et Automatica*, **5**, nr 1, 121-131