

## BADANIA MODELOWE REGENERATORA LINIOWEGO

H. SZLUMCZYK<sup>1</sup>, K. JANERKA<sup>2</sup>,

Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Odlewnictwa,  
 Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska  
 44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7

### STRESZCZENIE

Wykonane badania optymalizujące kształt przewężeń oraz warunki przepływu strumienia dwufazowego (prędkości) z wykorzystaniem układów modelowych umożliwiły określenie najkorzystniejszej postaci konstrukcyjnej elementów zmieniających trajektorię ruchu cząstek w regeneratorze liniowym. Stanowiły one podstawę do ich wykonania i wprowadzenia do badawczego układu modelowego. W publikacji przedstawiono metodę realizacji badań oraz zamieszczono uzyskane wyniki.

*Key words: physical modeling, diphas stream flow, linear regenerator*

### 1. WPROWADZENIE

W projektowaniu nowych rozwiązań konstrukcyjnych i technologii wykorzystuje się informacje w postaci wzorów obliczeniowych, tablic zawierających wskaźniki i współczynniki zaczerpnięte z dotychczasowej praktyki. W przeważającej liczbie przypadków dane te wystarczają do zaprojektowania nowych rozwiązań lub procesów technologicznych. Zdarza się jednak, że nowe rozwiązanie daleko odbiega od dotychczasowych i nie można określić jego właściwości metodami obliczeniowymi. Konieczne jest wtedy przeprowadzenie badań doświadczalnych na modelu wykonanym w pomniejszonej skali.

W publikacji zawarty jest opis badań przeprowadzonych na modelu fizycznym regeneratora liniowego celem zoptymalizowania jego postaci konstrukcyjnej, uwzględniającej stosowane przewężenia w rurociągu pneumatycznego układu w warunkach

---

<sup>1</sup> Dr inż., [henryk.szlumczyk@polsl.pl](mailto:henryk.szlumczyk@polsl.pl)

<sup>2</sup> Dr inż., [krzysztof.janerka@polsl.pl](mailto:krzysztof.janerka@polsl.pl)

rzeczywistych. Zastosowany układ modelowy umożliwił dobór parametrów geometrycznych minimalizacji oporów przepływu strumienia dwufazowego przy maksymalnym wykorzystaniu jego energii w warunkach oddziaływania cząstek względem siebie.

## 2. MODELOWANIE FIZYCZNE

### 2.1. Podobieństwo fizyczne

W praktyce badawczej konieczne jest poznanie określonych wielkości fizycznych oraz zależności występujących między nimi. Tak na przykład model jest podobny do obiektu pod względem rozkładu prędkości, które w odpowiadających sobie punktach określonych geometrią układu zachowują stały stosunek. Warunek ten jest zazwyczaj ograniczany dla danego zjawiska. I tak np. przy przepływie cieczy (płynów) przez rurociąg uwzględniana jest średnia wartość prędkości strumienia w określonym przekroju, rzadziej jej rozkład wzdłuż średnicy rurociągu. Wymaga to ustalenia jednej skali dla wszelkich rodzajów prędkości bez względu na ich fizyczny charakter. Podobne ustalenia należy przeprowadzić w odniesieniu do innych wielkości fizycznych. Wyznaczone za pomocą analizy wymiarowej wielkości dotyczą wielkości o tym samym wymiarze bez względu na ich sens fizyczny. W tym przypadku nie można postać dokładniejszych wskazówek postępowania. Analizę wymiarową przeprowadzamy na podstawie badanego zjawiska, a nie wyłącznie na podstawie teorii podobieństwa. Analiza wymiarowa pozwala wyznaczyć związki pomiędzy skalami, które przedstawia się zwykle w postaci:

$$\frac{k_p}{k_\rho \cdot k_w} = l \quad (1)$$

gdzie:  $k_p = p'/p$  - jest skalą ciśnień,  $k_\rho = \rho'/\rho$  - jest skalą gęstości,  $k_w = w'/w$  - jest skalą prędkości.

Podstawiając do równania (1) wielkości charakteryzujące obiekt i model oraz rozdzielając stronami otrzymuje się drugą bardzo często spotykaną postać zw. liczbą Eulera:

$$Eu = \frac{p}{\rho \cdot w^2} = \frac{p'}{\rho' \cdot w'^2} = Eu' \quad (2)$$

Zarówno równanie (1) jak i (2) można traktować jako kryteria podobieństwa.

## 2.2. Kryteria podobieństwa

Metody określania kryteriów podobieństwa umożliwiają ich wyznaczenie w hydromechanice na podstawie znajomości wymiarów wielkości fizycznych występujących w tych procesach. Istnieje możliwość określenia wszystkich możliwych związków pomiędzy skalami poszczególnych wielkości fizycznych na podstawie dostępnej literatury. Jednakże sposób ten jest mało praktyczny, ponieważ otrzymuje się trudne do spełnienia warunki dotyczące np wielkości grawitacji, gęstości, lepkości napięcia powierzchniowego cieczy itp.

Najczęściej występujące kryteria podobieństwa określone są liczbami.

**Liczba Reynoldsa (Re)** wyraża stosunek sił dynamicznych do sił tarcia występujących podczas przepływu cieczy:

$$Re = \frac{d \cdot w}{\nu} \quad (3)$$

**Liczba Froude'a (Fr)** jest to stosunek sił dynamicznych do sił ciężkości, która może być wyłączona z rozważań przy przetłaczaniu cieczy przez poziomy przewód za pomocą pompy:

$$Fr = \frac{w^2}{g \cdot d} \quad (4)$$

**Liczba Eulera (Eu)** posiada kilka znaczeń fizycznych, z których najczęściej określany jest stosunek różnicy ciśnień w określonych punktach modelu do tzw. ciśnienia dynamicznego:

$$C = \frac{2\Delta p}{\rho \cdot w} = 2Eu = f(Re) \quad (5)$$

**Liczba Macha (Ma)**, którą interpretujemy jako stosunek prędkości przepływu do prędkości rozchodzenia się fali ciśnień:

$$Ma = \frac{w}{c} = \frac{w'}{c'} = Ma' \quad (6)$$

## 3. BADANIA MODELOWE

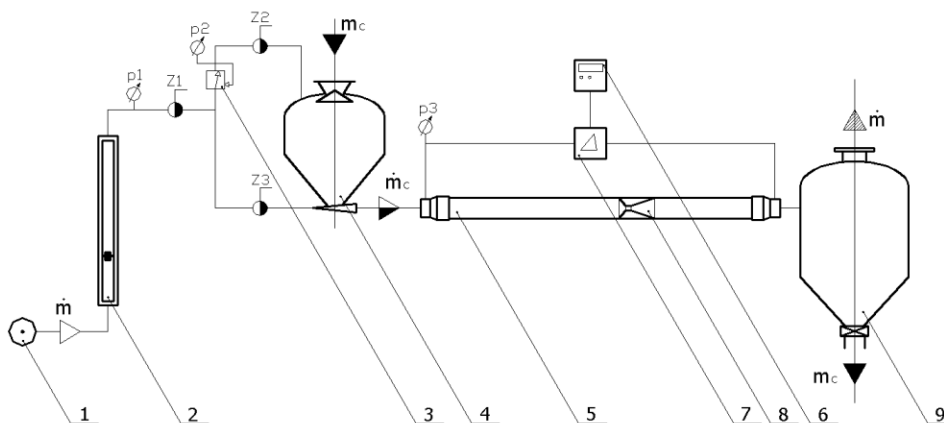
### 3.1. Opis stanowiska badawczego

Schemat układu przedstawiony jest na rys. 1. Układ badawczy zbudowany w oparciu o udostępnione elementy, zasilany jest z przemysłowej sieci pneumatycznej. Sieć pneumatyczna wyposażona jest w zespół sprężarek dużej wydajności oraz zbiornik wyrównawczy.

Zasilanie do układu badawczego podłączone jest poprzez króciec 1, następnie sprężone powietrze przepływa przez rotametr 2. Wartość wielkości strumienia powietrza regulowana jest zaworem na rotametrze 2. Powietrze poprzez zawory Z1 i Z3 przepływa do komory mieszania podajnika komorowego 4. Wielkość ciśnieniaw komorze podajnika komorowego regulowana jest za pomocą zaworu redukcyjnego 3. Zawór

redukcyjny wyposażony jest w manometr wskazujący wartość nadciśnienia w podajniku komorowym 4. Uzupelnianie komory podajnika w materiał sypki odbywa się poprzez otwór z zamknięciem dzwonowym. Materiał sypki z podajnika komorowego 4 jest przetłaczany do komory mieszania. W komorze mieszania materiał sypki przejmuje część energii kinetycznej strumienia powietrza. Następnie strumień dwufazowy przepływa przez prosty odcinek pomiarowy 5 wykonany z tworzywa przezroczystego. Na tym odcinku w odległości gwarantującej ustabilizowanie się przepływu montowane są zwężki 8. Różnicowym czujnikiem ciśnienia 7 dokonujemy pomiaru spadku ciśnienia, którego wartość odczytywana jest na mierniku 6. Ostatecznie strumień dwufazowy kierowany jest do urządzenia odbiorczego 9, w którym w warunkach ciśnienia otoczenia następuje oddzielenie fazy stałej od gazowej.

Układ badawczy składa się z następujących elementów: 1 - zasilanie, 2 - rotametr RIN-605, 3 - zawór redukcyjny, 4 - podajnik komorowy przetłaczający, 5 - rurociąg (odcinek pomiarowy), 6 - przetwornik różnicowy ciśnienia DMD331, 7 - miernik MP-03, 8 - zwężka, 9 - urządzenie odbiorcze, Z1-3- zawory odcinające.

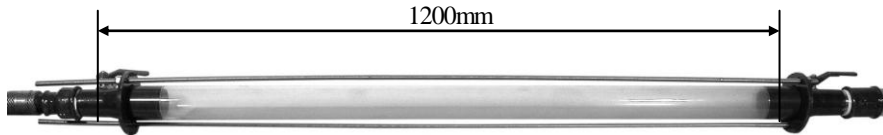


Rys.1. Schemat stanowiska badawczego

Fig.1. Test stand scheme

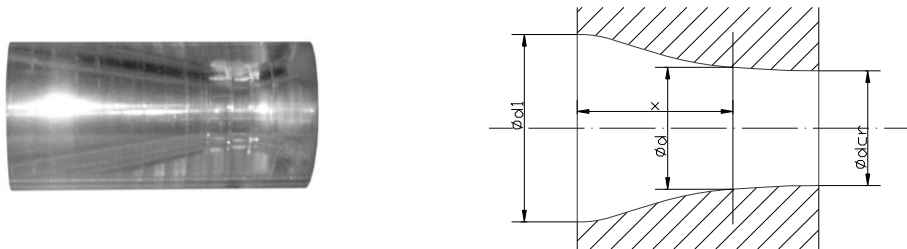
Odcinek pomiarowy (rys. 2) został wykonany z przezroczystej rury z polime-takrylanumetylu (pleksi) o średnicy wewnętrznej 50mm. Na odcinku tym dochodzi do stabilizacji warunków procesu przepływu strumienia dwufazowego.

W układ badawczy zamontowano w przepływowym systemie zwężki charakte-rystyczne rozkład strumienia dwufazowego w warunkach jego przepływu.



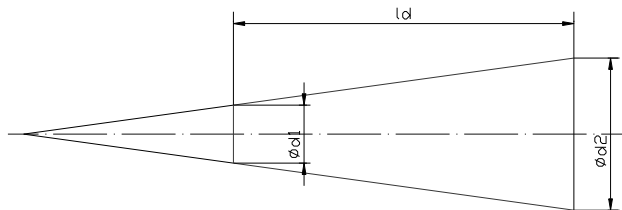
Rys. 2. Odcinek pomiarowy  
Fig. 2. Segment measurements

Zmienne warunki przepływu strumienia uzyskano poprzez zastosowanie zwężki składającej się z dyszy Witoszyńskiego i dyfuzora Laval'a (rys. 3). Zwężka została wykonana ze sklejonych krążków wyciętych techniką laserową z polimetakrylanu-metylu. Zastosowana dysza Witoszyńskiego jest dyszą poddźwiękową



Rys. 3. Zwężka pomiarowa i profil dyszy określonej wzorem Witoszyńskiego  
Fig. 3. Measuring tube and nozzle profile by Witoszyński equation

Częścią wylotową jest dyfuzor posiadający kształt rozbieżny zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 4. Jego długość zależy od kąta rozwarcia  $\delta_d$ , który w praktyce wynosi  $6\div 8^\circ$ . Stosowanie większych kątów nie jest wskazane, ze względu na możliwość oderwania się warstwy przyściennej strumienia gazu od powierzchni dyfuzora, co obniża jego sprawność.



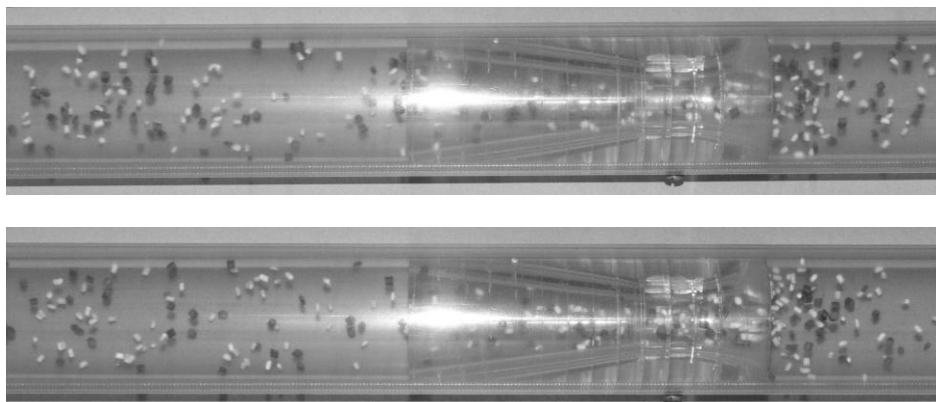
Rys. 4. Schemat wymiarowy dyfuzora  
Fig. 4. Dimensional scheme of diffuser

### 3.2. Przebieg procesu badawczego i jego wyniki.

Dla realizacji postawionego zadania badawczego przeprowadzono eksperymenty polegające na wprowadzeniu cząstek fazy stałej do strumienia gazu dozownikiem o regulowanej wydajności w sposób ciągły. Badania realizowane były celem dokonania wyboru najkorzystniejszego rozwiązania geometrycznego układu przewężeń stosowanych w regeneratorze liniowym. Proces badawczy obejmował analizę warunków przepływu strumienia w zróżnicowanych układach geometrycznych przewężeń wprowadzanych do przewodu transportowego, celem wywołania zaburzeń powodujących oddziaływanie cząstek na siebie. Podczas badań dokonywano pomiarów prędkości przepływu strumienia o zróżnicowanej koncentracji określając spadek ciśnienia na odcinku pomiarowym układu przepływowego analizując rozkład cząstek w tym strumieniu. Optymalnym rozwiązaniem jest układ wywołujący najbardziej intensywne zmiany trajektorii ruchu cząstek w strumieniu przy najmniejszych oporach przepływu określanych spadkiem ciśnienia. Wyniki badań i obliczeń parametrów przepływowych strumienia dwufazowego (prędkości, koncentracje, spadki ciśnień) zamieszczono w tab. 1.

W tab. 2 zamieszczono wyniki obliczeń prędkości w przekroju bez przewężenia ( $w_1$ ) oraz w przewężeniu ( $w_2$ ) i liczb Reynoldsa, Frouda i Macha opisujące warunki przepływu w procesie badawczym.

Badania przepływu strumienia dwufazowego w analizowanych układach rejestrowane były również metodą fotograficzną. Przykładowe zdjęcia rozmieszczenia cząstek stałych w strumieniu gazu przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zdjęcia przedstawiające przepływ strumienia w badanym układzie modelowym  
Fig.5. Photographs presenting stream flow in the tested model system

Tabela 1. Wyniki pomiarów i obliczeń

Table 1. Results of measurements and calculations

Lp	P <sub>4</sub> MPa	m <sub>g</sub> m <sup>3</sup> /s	Δp kPa	p <sub>1</sub> kPa	m kg	t s	m <sub>c</sub> kg/s	μ kg/kg
1	0,450	0,0278	0,2	17,28	4,4	12,7	0,346	9,65
2	0,400	0,0272	0,1	15,55	4,4	15,5	0,284	8,07
3	0,350	0,0233	0,1	11,83	3,8	12,5	0,304	10,08
4	0,225	0,0186	0,1	6,91	4	16,5	0,242	10,07
5	0,100	0,0139	0,1	3,19	1,9	11,6	0,164	9,13
6	0,400	0,0272	9,1	18,61	3,4	15,3	0,222	6,32
7	0,300	0,0283	9,4	21,93	3,4	16	0,213	5,80
8	0,200	0,0261	7,5	21,26	2,6	18	0,144	4,28
9	0,400	0,0233	8,8	23,92	5,6	18,4	0,304	10,09
10	0,300	0,0233	8,8	23,92	4	13	0,308	10,20
11	0,200	0,0233	3,6	10,63	1,8	18,5	0,097	3,23
12	0,400	0,0272	4,1	21,26	4,8	15,5	0,310	8,80
13	0,300	0,0233	2,7	15,28	6	19,5	0,308	10,20
14	0,225	0,0186	1,9	9,04	4	16,5	0,242	10,07
15	0,100	0,0139	0,8	4,65	2,4	16	0,150	8,36

Tabela 2. Wartości prędkości oraz liczb Reynoldsa, Froudea i Macha w układzie badawczym

Table 2. Values of velocity and Reynolds's, Froude's and Mach's numbers in experimental system

L.p.	w <sub>1</sub> m/s	w <sub>2</sub> m/s	Re <sub>1</sub>	Re <sub>2</sub>	Fr <sub>2</sub>	Ma <sub>2</sub>
1	15,132	15,132	50710,2	50710,2	466,96	0,0524
2	14,823	14,823	49675,9	49675,9	448,11	0,0513
3	12,708	12,708	42588,1	42588,1	329,35	0,0440
4	10,139	10,139	33979,2	33979,2	209,66	0,0351
5	7,561	7,561	25339,9	25339,9	116,60	0,0262
6	14,823	76,565	49675,9	112899,8	27171,71	0,2649
7	15,431	79,706	51714,1	117531,9	29447,09	0,2758
8	14,224	73,470	47668,2	108336,8	25019,72	0,2542
9	12,708	65,641	42588,1	96791,0	19971,04	0,2271
10	12,708	65,641	42588,1	96791,0	19971,04	0,2271
11	12,708	65,641	42588,1	96791,0	19971,04	0,2271
12	14,823	41,175	49675,9	82793,2	5762,68	0,1425
13	12,708	35,300	42588,1	70980,1	4235,53	0,1221
14	10,139	28,164	33979,2	56632,0	2696,24	0,0974
15	7,561	21,004	25339,9	42233,1	1499,48	0,0727

#### 4. PODSUMOWANIE

Wykorzystując wyniki badań modelowych optymalizujących postać konstrukcyjną przewężeń stosowanych w regeneratorze liniowym, które umożliwiły określenie ich kształtu (dysza Witoszyńskiego na wejściu i dyfuzor Laval'a na wyjściu) wykonano je z przezroczystego materiału (metaplex) celem prowadzenia obserwacji ruchu cząstek podczas przepływu strumienia dwufazowego. Materiałem przemieszczanym w badawczym układzie modelowym był granulowany polipropylen o wielkości cząstek 2 – 3 mm w kolorze białym i czarnym. Wyniki pomiarów i obserwacji umożliwiają analizę zmian parametrów ruchu strumienia dwufazowego w poszczególnych częściach regeneratora liniowego. Widoczne są spiętrzenia cząstek u wlotu do regeneratora liniowego (zwężenia) znakomitym zwiększenie intensywności oddziaływania między nimi przy niewielkich oporach ruchu strumienia określonych różnicą ciśnień.

#### LITERATURA

- [1] H. Szlumczyk: *Analiza ruchu strumienia dwufazowego w regeneratorze liniowym* *Archiwum Odlewnictwa Nr 15, Rocznik 5*, Wyd. PAN Katowice 2005.
- [2] H. Szlumczyk: *Badania procesu ścierania zużytego spoiwa z powierzchni ziaren osnowy w regeneratorze liniowym*, *Transport Pneumatyczny 2005*, IX Międzynarodowa Konferencja, Sierpień – Kielce 2005.
- [3] H. Szlumczyk, K. Janerka: *Modelowanie fizyczne przepływu strumienia dwufazowego w regeneratorze liniowym*, *Mat. Konf. VII Międzynarodowej Konf. Nauk. „Zapewnienie Jakości w Odlewnictwie”*, Słowacja, 05.2006.
- [4] L. Miller, A. Wilk: *Teoria podobieństwa w badaniach modeli fizycznych i matematycznych*, Monografia, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1977.

#### MODEL RESEARCHES OF LINEAR REGENERATOR

#### SUMMARY

The researches optimizing throats shape and conditions of stream flow (velocity) with using the model system made possible the best constructional form of elements reversals of motion particles in a linear regenerator. They were a basis to their performance and implementation into model system. The publication presents the method of tests realization on the model stand as well as the obtained results.

*Badania wykonano w ramach realizacji projektu badawczego nr 3 T08B 052 26 finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki*

Recenzował: prof. dr hab. inż. Franciszek Binczyk