

**Wyznaczenie strumienia masy w dławnicy labiryntowej  
metodą Egli.  
Wyznaczenie liczby Macha w ostatniej szczelinie dławnicy.**

opracował Damian Joachimiak

## **Wyznaczenie strumienia masy w dławnicy labiryntowej metodą Egli. Wyznaczenie liczby Macha w ostatniej szczelinie dławnicy.**

### 1. Cel ćwiczenia:

- omówienie sposobu działania turbin parowych i wpływu szczelności dławnic labiryntowych na ich sprawność
- przedstawienie miejsca usytuowania dławnic w turbinach parowych
- omówienie różnych geometrii uszczelnień labiryntowych
- użycie wybranej metody obliczeniowej w celu określenia wartości przecieku przepływającym w modelowym segmencie uszczelnienia
- skonfrontowanie obliczonej teoretycznie wartości przecieku z rzeczywistym strumieniem masy przepływającym przez segment

### 2. Podstawowe wiadomości z mechaniki płynów i termodynamiki

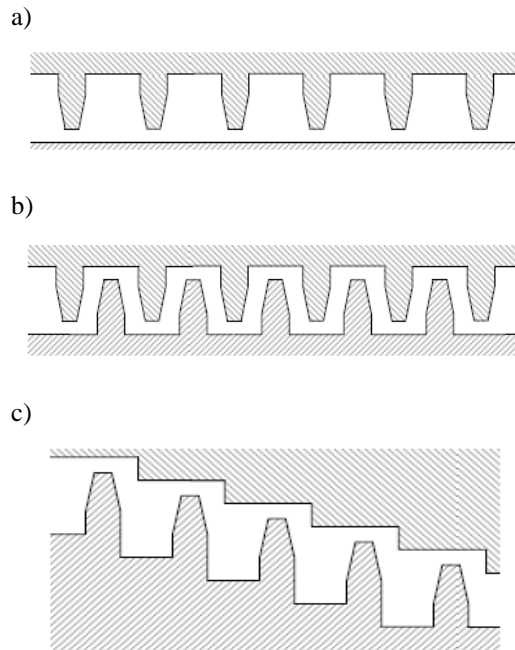
- zjawisko ekspansji
- strumień: masy, objętości
- linia prądu, tor cząsteczki
- ciśnienie: statyczne, dynamiczne, całkowite
- entalpia: statyczna, całkowita
- równanie: ciągłości przepływu, energii, Bernoulliego
- liczba: Macha, Reynoldsa
- przepływ: burzliwy

### 3. Cel stosowania uszczelnień

Celem zastosowania uszczelnień labiryntowych jest minimalizowanie przepływu płynu pomiędzy dwoma przestrzeniami, z których w jednej panuje wysokie ciśnienie czynnika roboczego, a w drugiej jest ono znacznie niższe. Dławnice labiryntowe umożliwiają ograniczenie przecieku pomiędzy dwoma powierzchniami cylindrycznymi – korpusem i wałem lub dwoma powierzchniami tarczowymi wykonującymi ruch obrotowy względem siebie. Uszczelnienia labiryntowe spełniają bardzo ważne funkcje w budowie i eksploatacji maszyn. Są one powszechnie stosowane w maszynach przepływowych, takich jak turbiny, sprężarki, dmuchawy i pompy. Zapobiegają wyciekowi różnych czynników roboczych, takich jak para, powietrze i gazy spalinowe, które w maszynach przepływowych mają wysoką temperaturę i ciśnienie. W turbinach parowych i gazowych niemal wyłącznie stosuje się uszczelnienia labiryntowe. W przypadku wirnikowych maszyn cieplnych, jakimi są turbiny parowe, stan uszczelnień znacząco wpływa na ich sprawność, zapobiegając wyciekowi pary o wysokim ciśnieniu i temperaturze z przestrzeni uszczelnianej.

### 4. Geometrie uszczelnień

Uszczelnienia bezstykowe mają różną budowę: mogą to być uszczelnienia labiryntowe zupełne, niezupełne i stopniowane, które pokazano na rysunku 1. Uszczelnienia labiryntowe składają się z połączonych szeregowo ze sobą kryz. W uszczelnieniu labiryntowym uzyskuje się turbulentny przepływ tuż za przewężeniem oraz w pewnym stopniu, zależnym od geometrii dławnicy, zdysypowanie energii kinetycznej czynnika przed następną szczeliną.



Rys 1. Uszczelnienia labiryntowe: a) niezupełne, b) zupełne, c) stopniowane

Uszczelnienia labiryntowe niezupełne (rys. 1.1 a) stosuje się w sytuacji, kiedy prędkość obrotowa pomiędzy elementem wirującym i stacjonarnym jest duża. Budowa tego typu uszczelnienia charakteryzuje się tym, że na powierzchni jednego elementu znajdują się zamocowane tarcze, natomiast powierzchnia drugiego elementu jest gładka. W takim uszczelnieniu następuje częściowe wyhamowanie czynnika roboczego. W turbinie parowej ten rodzaj uszczelnienia jest stosowany w miejscach oddalonych od łożysk wzdłużnych oporowych ze względu na dylatację termiczną wału i korpusu.

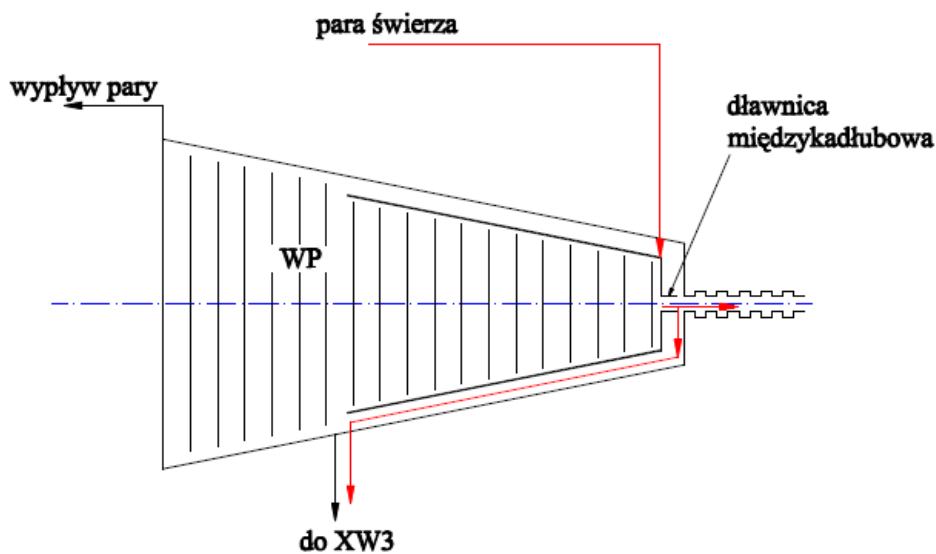
Uszczelnienia labiryntowe pełne (rys. 1 b) są stosowane w miejscach o małych względnych przesunięciach osiowych elementów współpracujących. W tego typu uszczelnieniach występuje znaczne wyhamowanie czynnika roboczego w komorach pomiędzy kryzami.

Geometria uszczelnienia labiryntowego stopniowanego, pokazana na rysunku 1 c, zawiera w sobie elementy uszczelnienia półpełnego i pełnego. Dodatkowo obydwie powierzchnie współpracujące są stopniowane. Uszczelnienia tego typu stosuje się w

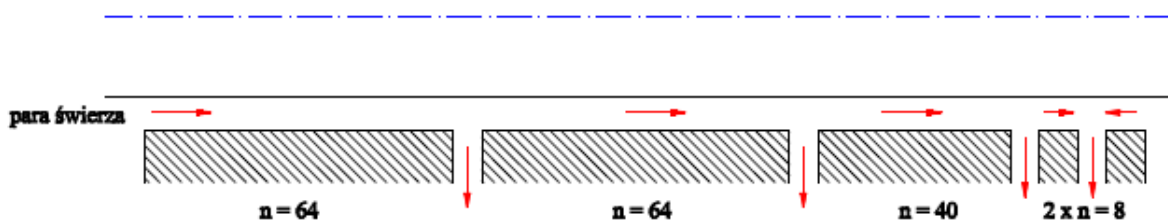
maszynach przepływowych o zmiennej geometrii wału i korpusu, przede wszystkim w silnikach turbogazowych.

W turbinie parowej wysokoprężnej najbardziej odpowiedzialną częścią za szczelność wirnika jest dławnica przednia – międzykadłubowa (rys. 3 a). Przykładowo uszczelnienie przednie turbiny 13UC105K składa się z pięciu segmentów. Charakteryzuje je różna geometria oraz różna liczba ząbków, którą oznaczono jako  $n$  (rys. 3 b).

a)



b)



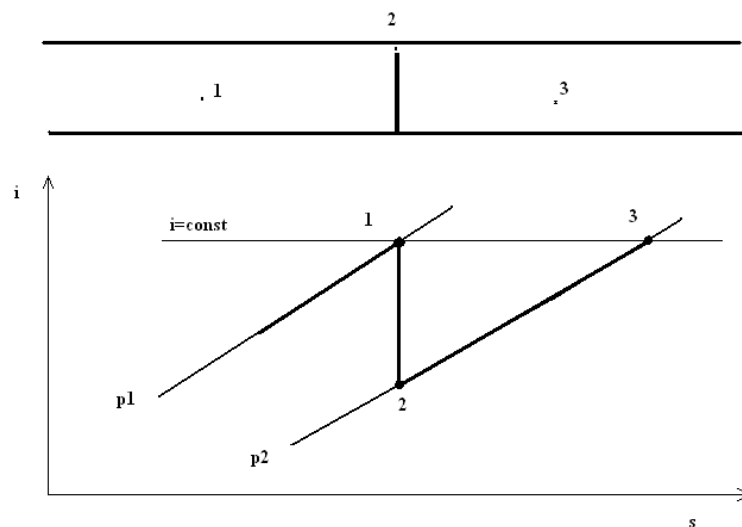
Rys. 3. Schemat rozpyływu pary w korpusie WP turbiny 13UC105K, a) ogólny, b) szczegółowa budowa dławnicy przedniej

## 5. Metody obliczeń uszczelnień labiryntowych

Uszczelnienie labiryntowe składa się z sekwencji szeregowo połączonych przewężeń. Zakłada się, że prędkość czynnika roboczego przed każdym przewężeniem jest pomijalnie

mała. W każdej szczelinie zachodzi zamiana części energii potencjalnej ciśnienia na energię kinetyczną, a zarazem spadek entalpii (odcinek 1–2, rys. 4). W następnej komorze następuje izobaryczne wyhamowanie strugi na skutek dyssypacji energii kinetycznej w postaci ciepła (odcinek 2–3, rys. 4.). Przepływ gazu przez uszczelnienie oraz zmianę parametrów termodynamicznych pokazano na rys. 2.1.

Zakłada się, że na całej długości uszczelnienia czynnik ma stałą wartość entalpii całkowitej.



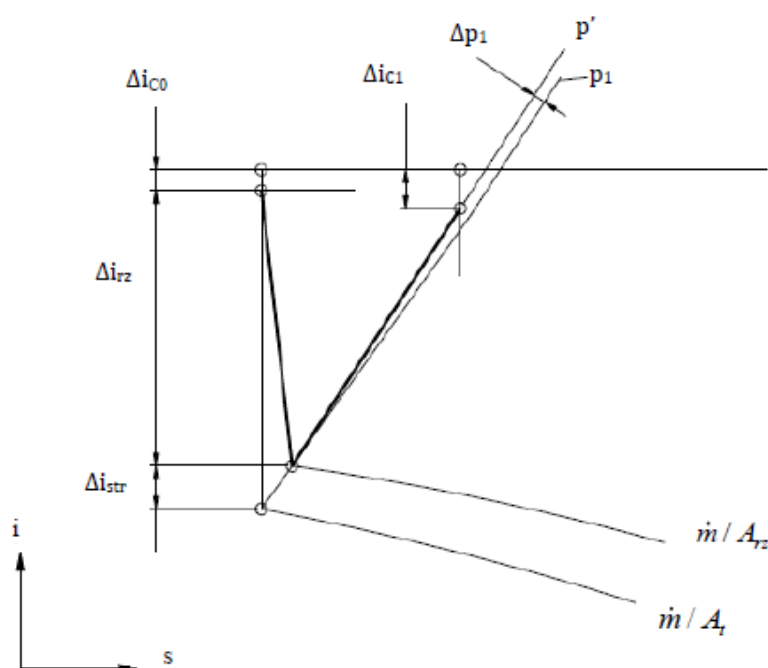
Rys. 4. Zmiany parametrów termodynamicznych gazu przepływającego przez szczelinę

Rzeczywisty przepływ w dławnicy labiryntowej jest znacznie bardziej skomplikowany w porównaniu z teoretycznie zakładanym. Ekspansja gazu w szczelinie dławnicy nie jest procesem adiabatycznym, jak założono w modelu teoretycznym. Dodatkowo w rzeczywistym przepływie występuje zjawisko warstwy przyściennej w komorach pomiędzy kryzami oraz zjawisko kontrakcji przepływu strumienia gazu wypływającego ze szczeliny. W praktyce komory pomiędzy przewężeniami mają skończoną objętość, co znaczy, że energia kinetyczna gazu wypływającego z szczeliny nie jest całkowicie zdysypowana w postaci ciepła.

Rzeczywisty przepływ jest bardzo złożony i trudno jest uwzględnić wszystkie zjawiska zachodzące w dławnicy labiryntowej. Aby określić rzeczywisty strumień masy przepływający przez danego typu uszczelnienie, wyznacza się jego wartość teoretyczną  $\dot{m}_t$ , a następnie na podstawie badań określa się jego wartość rzeczywistą. Miarą efektywności uszczelnienia labiryntowego jest współczynnik przepływu  $\mu$ , określony jako iloraz rzeczywistego strumienia masy do teoretycznie wyznaczonego.

$$\mu = \frac{\dot{m}_{rz}}{\dot{m}_t} \quad (2.1)$$

Rzeczywisty przebieg procesu rozprężania w szczelinie i dyssypacji energii kinetycznej w następnej komorze przedstawiono pogrubioną linią na rysunku 5. Dopływający do szczeliny gaz ma pewną energię kinetyczną i w efekcie mniejszą entalpię niż teoretycznie zakładana o wartość  $\Delta i_{C0}$ . W rzeczywistości gaz wypływający ze szczeliny nie zachowuje stałego ciśnienia  $p_1$ . Wzrasta ono przed następną szczeliną o wartość  $\Delta p_1$ . W efekcie rzeczywista linia rozkładu ciśnienia w dławnicy i linia ekspansji, oznaczona jako  $\dot{m}/A_{rz}$ , ma inny przebieg niż teoretycznie zakładana  $\dot{m}/A_t$ .



Rys. 5. Ekspansja teoretyczna i rzeczywista gazu w dławnicy we współrzędnych  $i-s$

Przedstawione metody obliczeniowe służą do wyznaczania wartości przecieku w uszczelnieniach, w których prędkość gazu nie przekracza prędkości dźwięku. Opierają się one na teoretycznych założeniach przepływu gazu przez kryżę.

Formuła Stodoli pozwalającą na obliczenie strumienia masy przepływającego przez uszczelnienie w następującej formie:

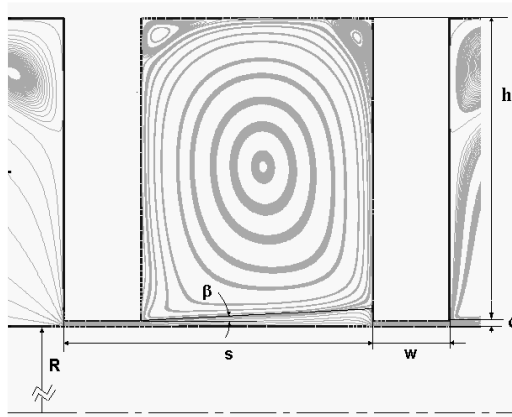
$$\dot{m} = \mu A_n \frac{1}{\sqrt{z}} \sqrt{\frac{p_1}{v_1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^2 \right]}$$

Wzór Egli pozwala określić wartość przecieku w następujący sposób:

$$\dot{m} = A\mu\varphi_n\sqrt{\frac{p_0}{v_0}} \quad (2.6)$$

Współczynnik oporu przepływu dla  $n$  kryz zdefiniowany jako:

$$\varphi_n = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{p_n}{p_1}\right)^2}{n + \left(\frac{2}{k}\right) \ln\left(\frac{p_1}{p_n}\right)}}$$



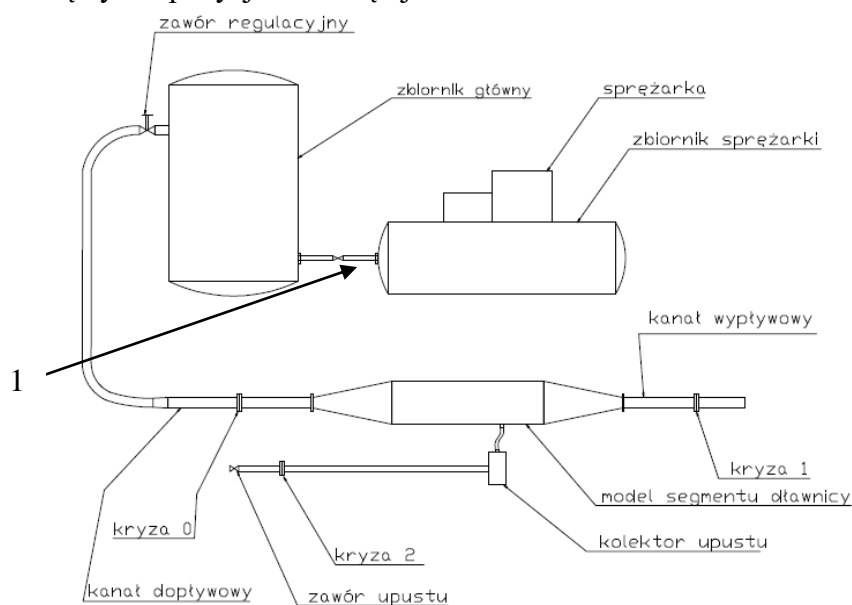
Rys. 6. Opis oznaczeń oraz symulacja przepływu w uszczelnieniu labiryntowym [32]

## Procedura uruchomienia stanowiska do badań uszczelnień labiryntowych

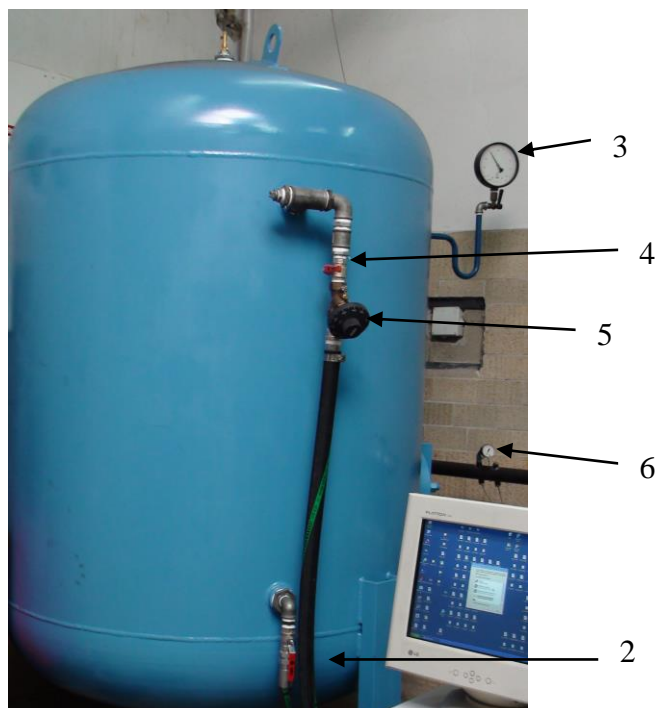
**UWAGA!** Stanowisko obsługuje tylko prowadzący zajęcia.

1. Jeżeli nadciśnienie w zbiorniku głównym jest mniejsze niż 2 bar, wówczas należy uzupełnić ciśnienie w zbiornikach w następujący sposób:

- Otworzyć zawór wypływowy znajdujący się przy zbiorniku sprężarki (1) i zawór na kanale doprowadzającym sprężone powietrze do zbiornika głównego (2). Zawory (4) i (5) muszą być w pozycji zamkniętej.







- Uruchomić sprężarkę, napełnić zbiorniki do maksymalnego ciśnienia 4 bar. Ciśnienie w zbiornikach należy odczytywać ze wskaźnika ciśnienia (3).
- 2. W celu zademonstrowania pracy stanowiska należy ustawić zawór wypływu powietrza (4) w pozycji całkowicie otwartej. Zaworem regulacyjnym (5) należy stopniowo zwiększać strumień masy dopływający do stanowiska.
- 3. Wartość nadciśnienia sprężonego powietrza dopływającego do segmentu stanowiska można odczytać ze wskaźnika (6).
- 4. Program archiwizujący zapisuje dane pomiarowe do plików, które poddano obróbce. Prowadzący zajęcia dysponuje plikiem dostosowanym do tematu zajęć dydaktycznych, w którym znajdują się wektory danych do obliczeń.

Do tematu: **Wyznaczanie strumienia masy przepływającego przez dławnicę labiryntową metodą Egli i określanie liczby Macha** należy odczytać z pliku o nazwie PEClab\_DEM\_BJ\_s = ... następujące dane:

nr wiersza danych	qm_0 [kg/s]	p_1 [Pa]	p_2 [Pa]	T_1 [K]	T_2 [K]
-------------------	-------------	----------	----------	---------	---------

- T\_1 – temperatura gazu przed dławnicą
- T\_2 – temperatura gazu za dławnicą
- p\_1 – ciśnienie absolutne gazu przed dławnicą
- p\_2 – ciśnienie absolutne za dławnicą

#### Literatura

- 1. PN-EN ISO 5167-1, ( Polska Norma)
- 2. D. Joachimiak, Badanie uszczelnień labiryntowych z upustem, praca doktorska

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Instytut Energetyki Ciepłej

ite.put.poznan.pl

**Wyznaczenie strumienia masy w dławnicy labiryntowej metodą Egli.  
Wyznaczenie liczby Macha w ostatniej szczelinie dławnicy.**

Imię Nazwisko:

Nr indeksu:

Rok akademicki/ **grupa laboratoryjna**

Data oddania:

Data zaliczenia:

Ocena:

Podpis prowadzącego:

**I. Odczytaj dane pomiarowe:**

lp.	nr wiersza danych	$q_{m_0}$ [kg/s]	$p_1$ [Pa]	$p_2$ [Pa]	$T_1$ [K]	$T_2$ [K]
1						

2						
3						
4						

**II. Dla każdego punktu pomiarowego wykonaj obliczenia:**

1. Gęstość i objętość właściwa gazu przed dławnicą

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad \rho_1 = \dots\dots\dots, \quad v_1 = \dots\dots\dots$$

2. Wyznaczenie strumienia masy ze wzoru Egli:

$$\dot{m} = A\mu\varphi_n\sqrt{\frac{p_1}{v_1}}$$

- współczynnik przepływu:  $\mu = 1$

Współczynnik oporu przepływu zdefiniowany jest następująco:

$$\varphi_n = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2}{n + \left(\frac{2}{\kappa}\right) \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}}$$

wykładnik izentropy dla powietrza  $\kappa = 1,4$

$$\varphi_n = \dots\dots\dots$$

- pole przepływu w kryzie  $A = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2s)^2]$

średnica uszczelnienia  $D = 0,15$  m

wysokość szczeliny  $s = \dots\dots\dots$

$$A = \dots\dots\dots$$

- liczba ząbków dławnicy  $n = 20$

Strumień masy:

$$\dot{m}_{Egli} =$$

- rzeczywisty współczynnik przepływu:  $\mu = \frac{\dot{m}_{rzeczywisty}}{\dot{m}_{Egli}}$

3. Wyznaczenie prędkości i liczby Macha gazu w ostatniej szczelinie dławnicy z równania ciągłości

$$\dot{m} = A\rho_2c$$

$$\frac{p_2}{\rho_2} = RT_2, c = \dots\dots\dots$$

- prędkość dźwięku  $a$ :

$$a = \sqrt{\kappa RT_2}$$

Liczba Macha:

$$Ma = \frac{c_n}{a}$$

**Tabela obliczeniowa:**

lp.	$\dot{m}$ [kg/s]	$c$ [m/s]	$a$ [m/s]	Ma [-]	$\mu$ [-]
1					
2					
3					
4					

### III. Wyniki i wnioski

- przedstaw wykresy wyników obliczeń w funkcji ciśnienia segmentem dławnicy p\_1