



Politechnika Wroclawska

**Laminarny, przejściowy i
turbulentny przepływ ciecży przez
gładkie kapilary**

Henryk Szewczyk

Wydział Mechaniczno-Energetyczny
październik 2009



Plan seminarium

1 Tło problemu i jego sformułowanie

2 Badania własne autora

- **Stanowiska badawcze i przebieg pomiarów**
- **Wyniki doświadczeń**
- **Współczynniki korekcyjne obliczone przez autora**

3 Podsumowanie wyników prac własnych autora



Problem badawczy

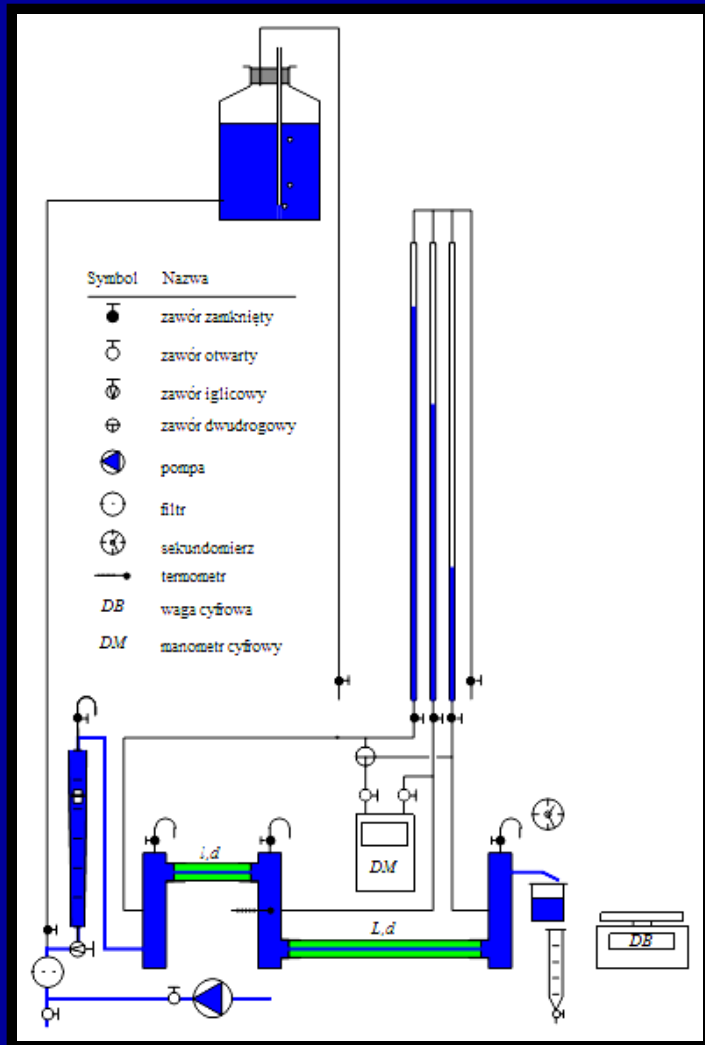
Laminarny, przejściowy i turbulentny przepływ cieczy przez gładkie kapilary

- ❑ Pośredni pomiar średnicy kapilary (z prawa Hagen-Poiseuille'a)
- ❑ Wyznaczenie doświadczalne hydraulicznych charakterystyk bezwymiarowych i rozpiętości przedziału przejścia laminarno-turbulentnego
- ❑ Zbadanie wpływu zaokrąglenia wlotu na krytyczną liczbę Reynoldsa
- ❑ Wyznaczenie współczynników strat miejscowych
- ❑ Obliczenie (wg danych literaturowych) współczynnika Coriolisa i 4. innych współczynników korekcyjnych

Badane obiekty to: mikrorurki - $d \in [1\mu\text{m}, 1\text{mm}]$, minirurki - $d \in [1, 4]\text{mm}$



Stanowisko pomiarowe 1.

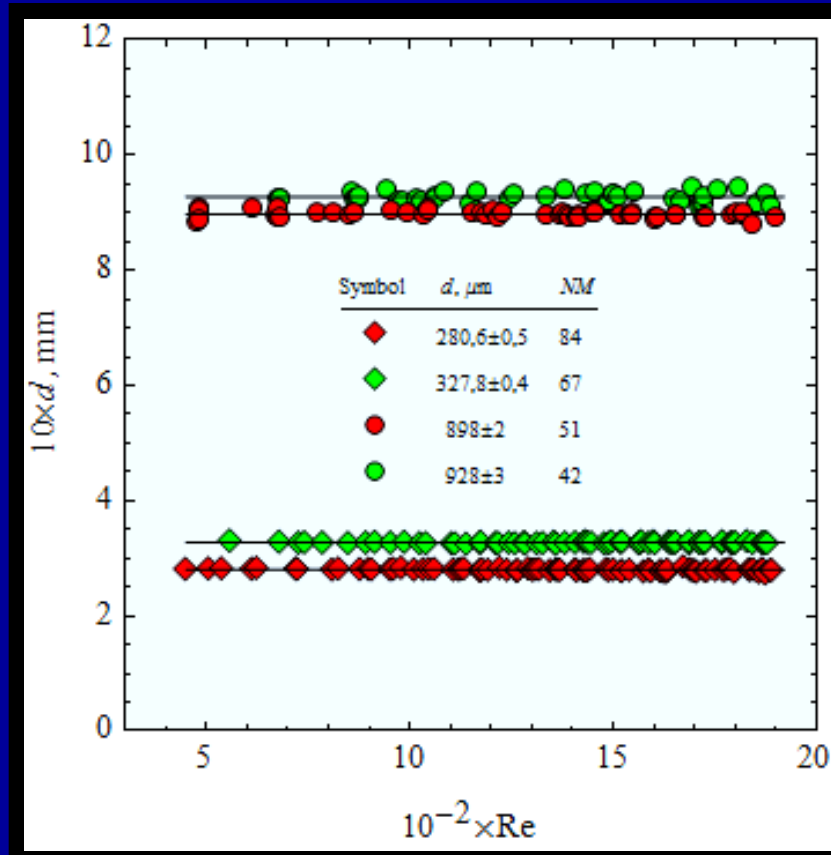


Przeznaczenie instalacji:
badania minirurek i
pośredni pomiar średnic
mini- i mikrorurek

**L, l – kapilary, o średnicy d ,
długa i krótka**



Pośredni pomiar średnic mikrorurek

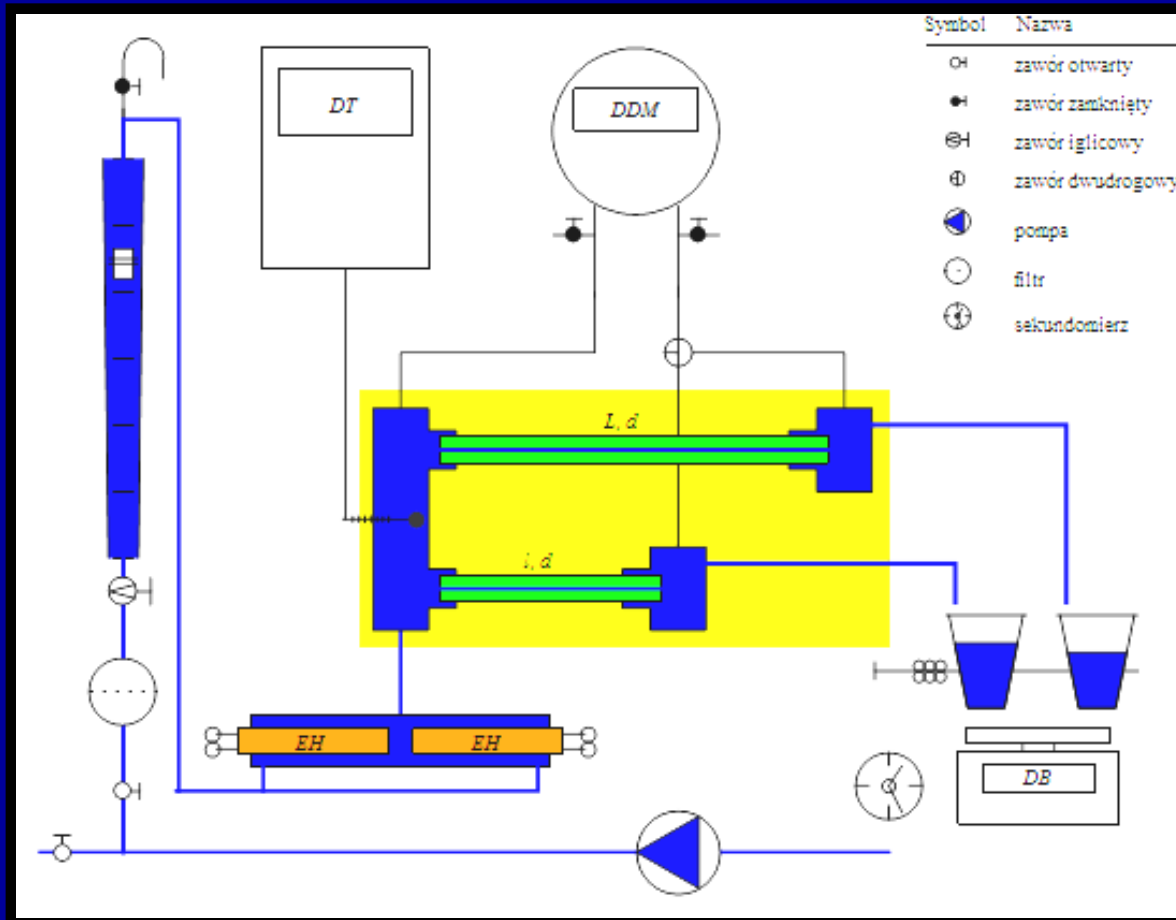


Średnice mikrorurek

Przykłady pomiarów
autora, na podstawie
prawa Hagen-
Poiseuille'a,
 $Re \in [0, 1900]$



Stanowisko pomiarowe 2.

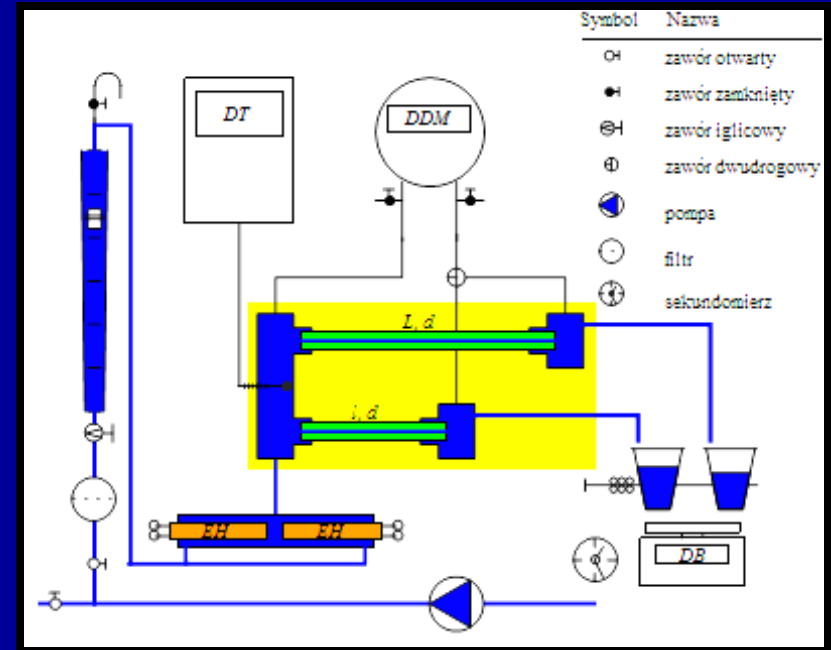
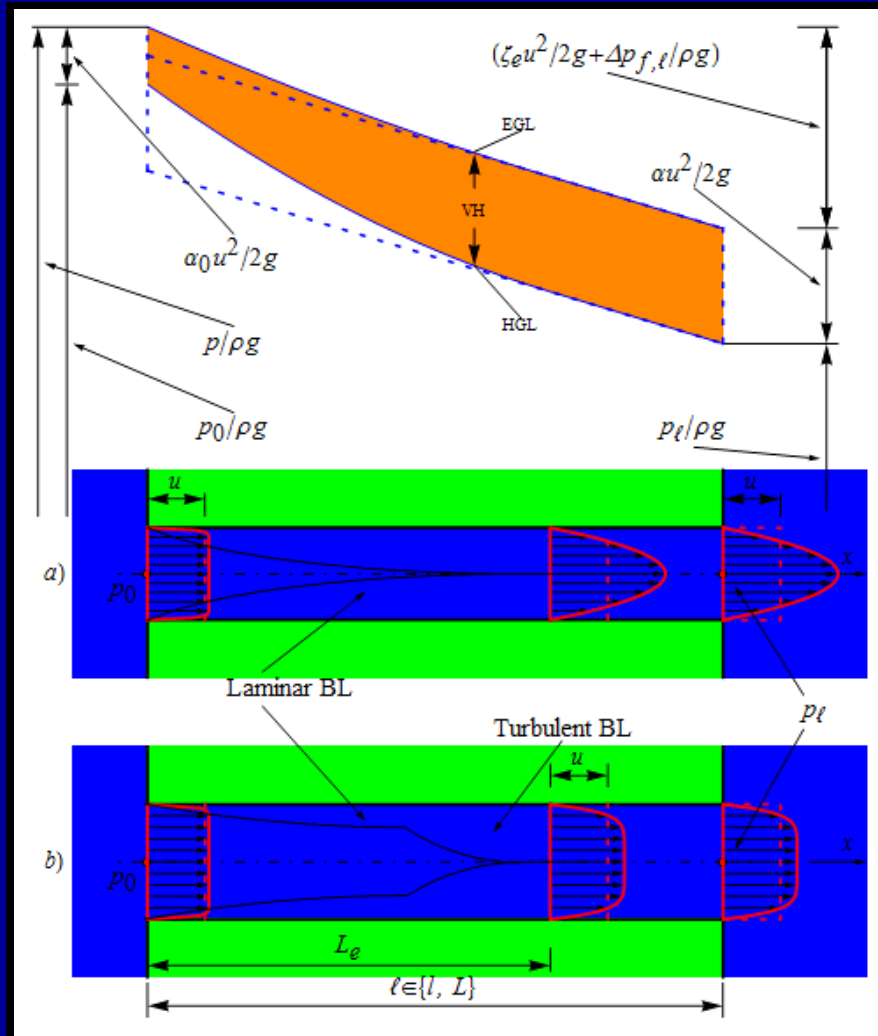


Przeznaczenie instalacji:
badanie
mikrorurek

***L, l* – kapilary,**
o średnicy *d*,
długa i krótka
Żółte pole to
obszar
zaizolowany
termicznie

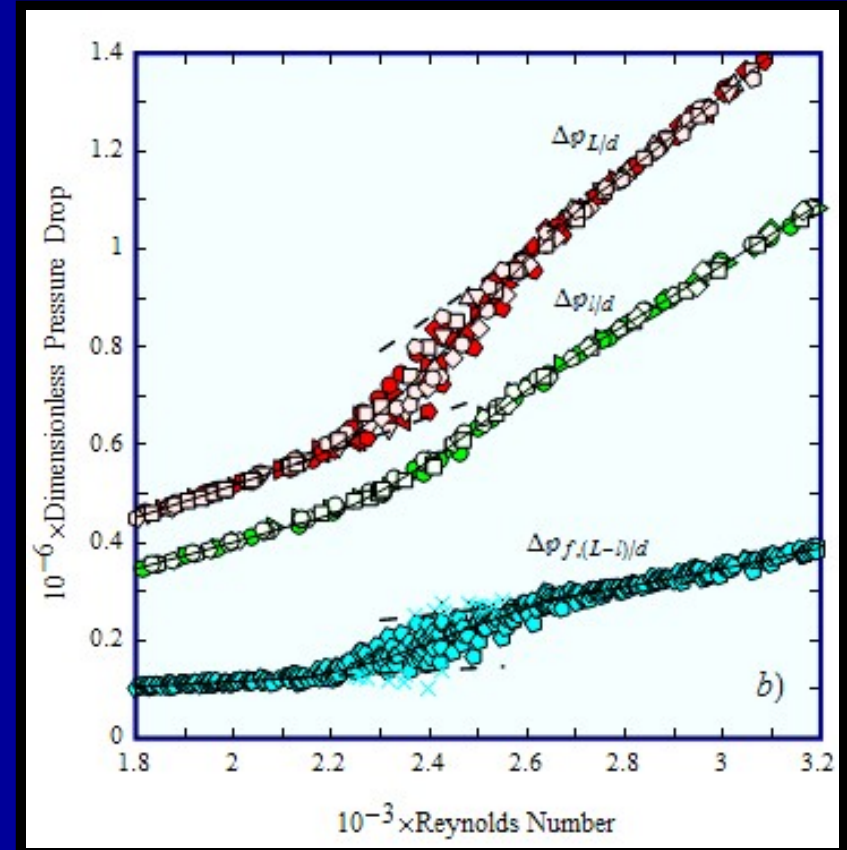
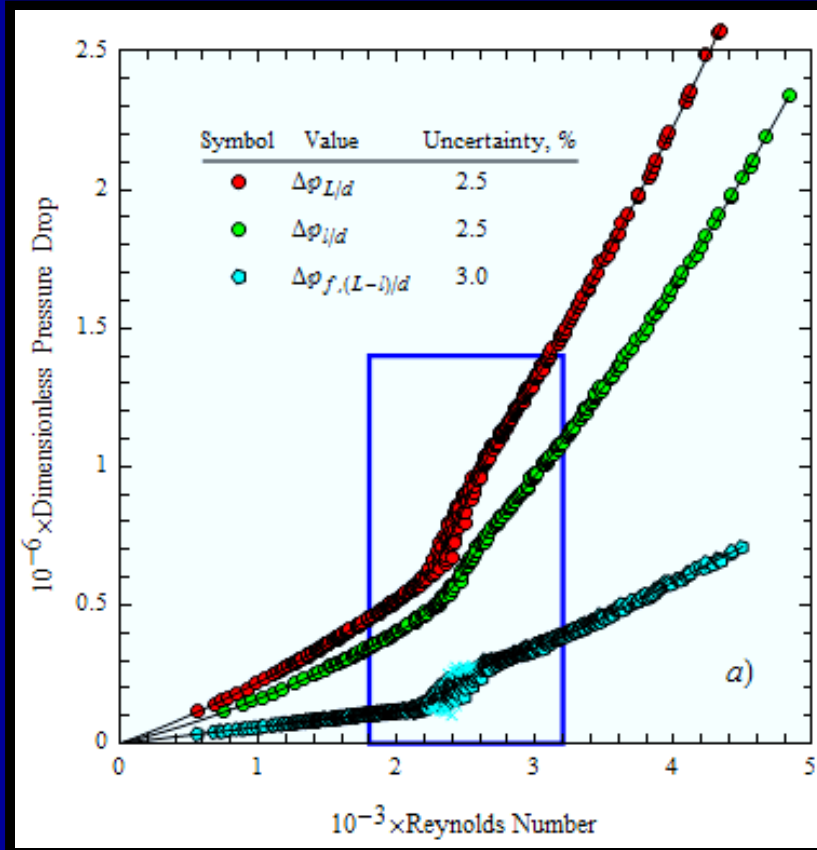


Ciśnienia i profile prędkości





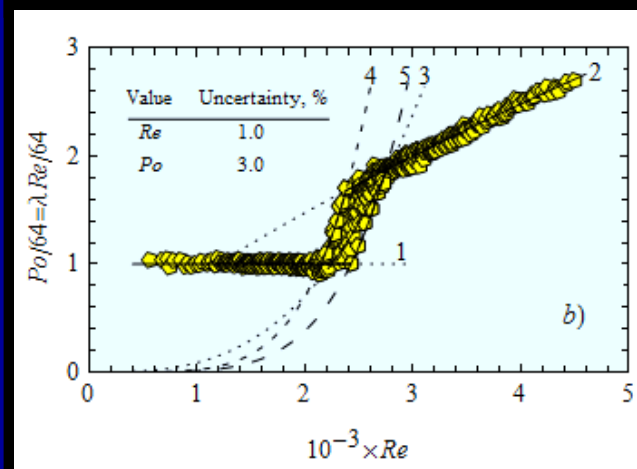
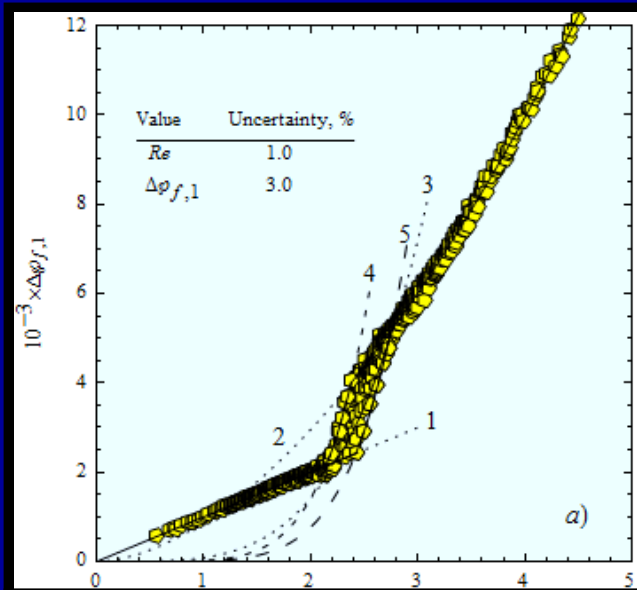
Charakterystyki hydrauliczne mikrorurek



Bezwymiarowe charakterystyki pary mikrorurek o średnicy 327,8 μm
(pomiar autor)



Charakterystyki hydrauliczne mikrorurek

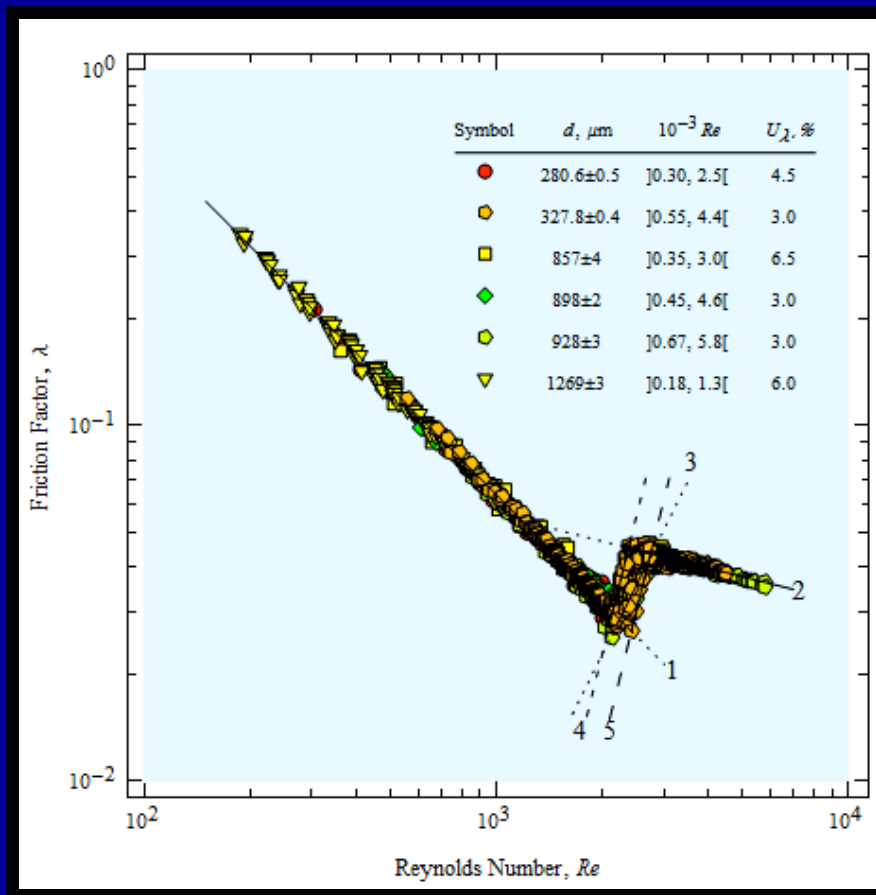


Wyniki badań autora
(współrzędne bezwymiarowe,
ostrokrawędziowe wloty,
327,8 μm , 526 wyników)

- 1 Prosta Hagen-Poiseuille'a**
- 2 Krzywa Blasiusa**
- 3 Krzywa Churchilla**
- 4, 5 Krzywe autora**



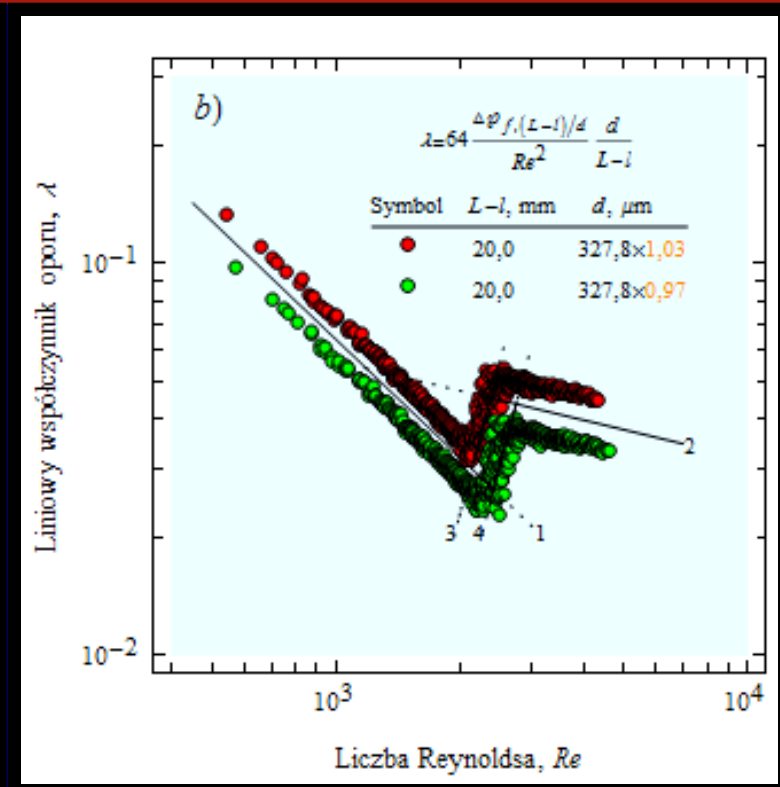
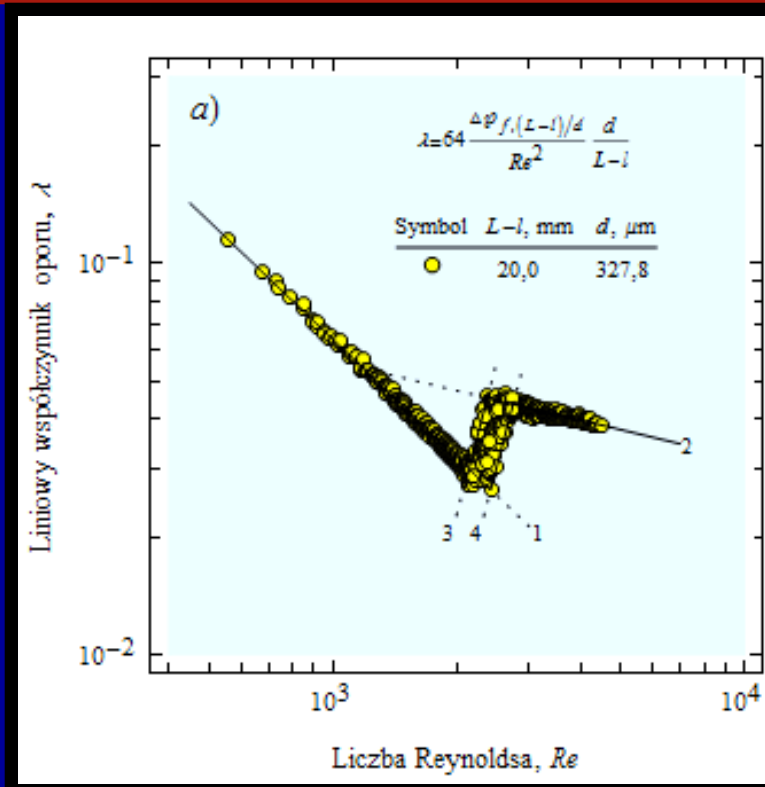
Współczynnik oporów liniowych



**Wyniki pomiarów
autora
(1420 wyników) na
tle krzywych:**

- 1 Hagen-Poiseuille'a
- 2 Blasiusa
- 3 Churchilla
- 4, 5 Autora

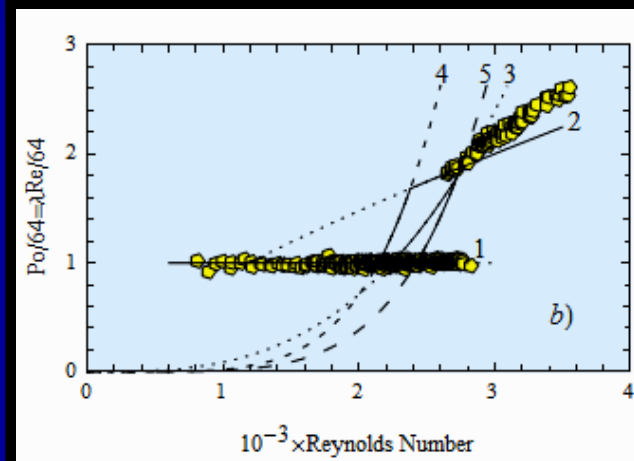
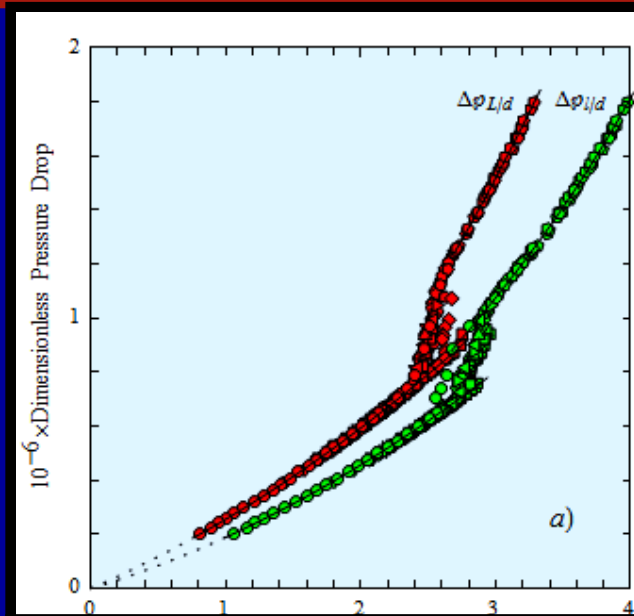
Niepewności pomiarowe średnicy



- a) Średnica pośrednio pomierzona przez autora
- b) Efekty niepewności pomiarowych średnicy



Efekt zaokrąglenia wlotów do mikrorurek (pomiarzy autora)



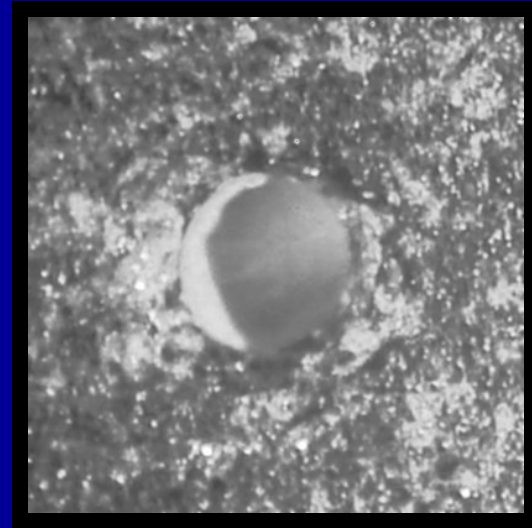
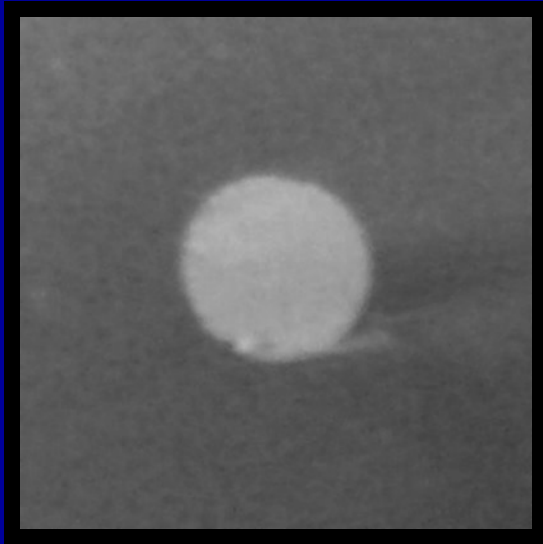
**Charakterystyki
bezwymiarowe pary
mikrorurek**

o średnicy 280,6 μm

**z różnie stopionymi
krawędziami
wlotowymi**



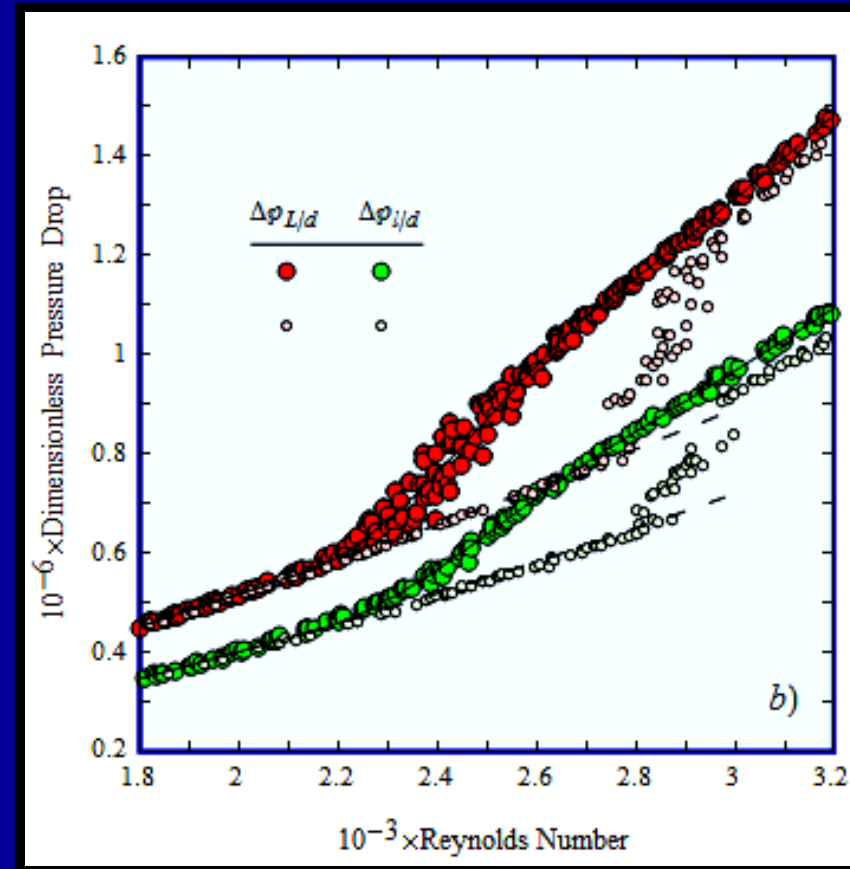
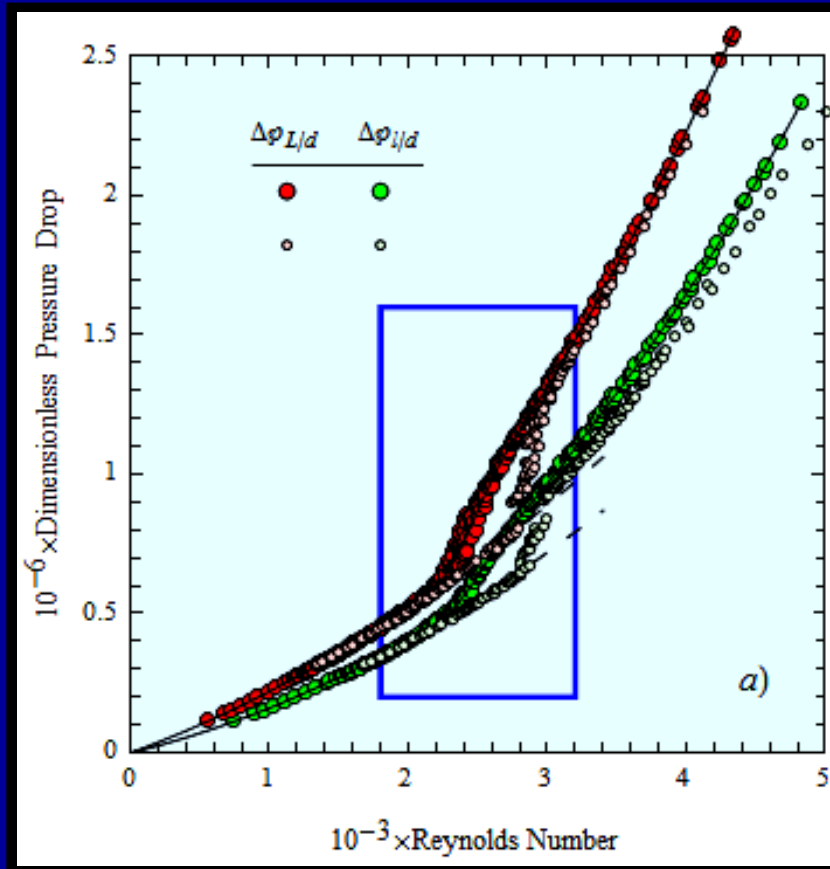
Efekt zaokrąglenia wlotów do mikrorurek (zdjęcia autora)



**Powierzchnia czołowa wlotu do mikrorurki o średnicy
280,6 μm przed i po jej oszlifowaniu**



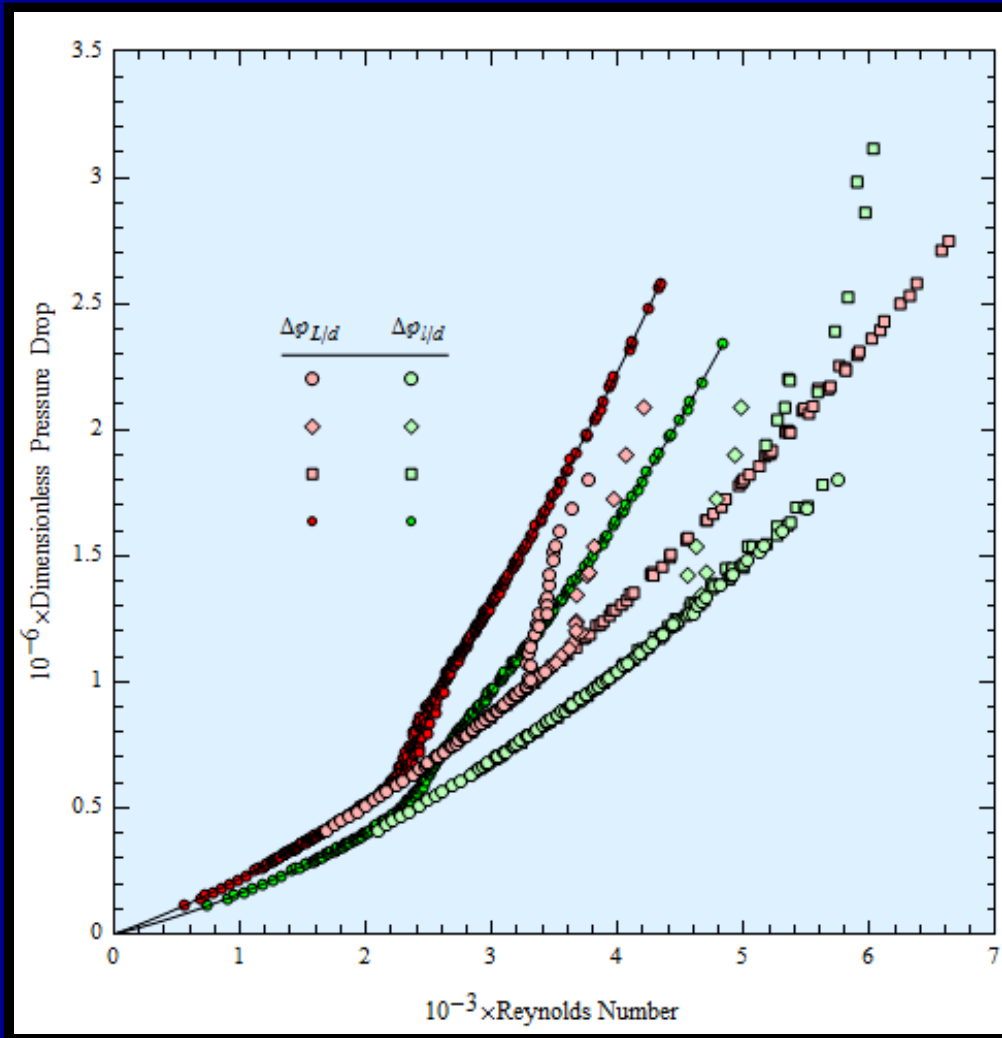
Efekt zaokrąglenia wlotów do mikrorurek (pomiarzy autora)



**Charakterystyki bezwymiarowe pary mikrorurek o średnicy 327,8 μm
(przed i po zeszlifowaniu ich czołowej powierzchni wlotowej)**



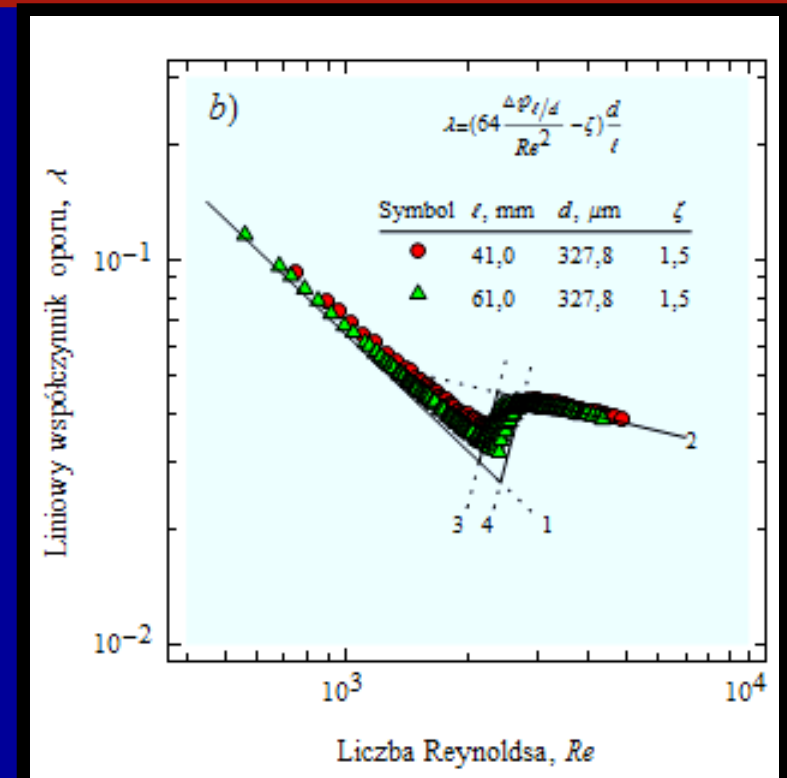
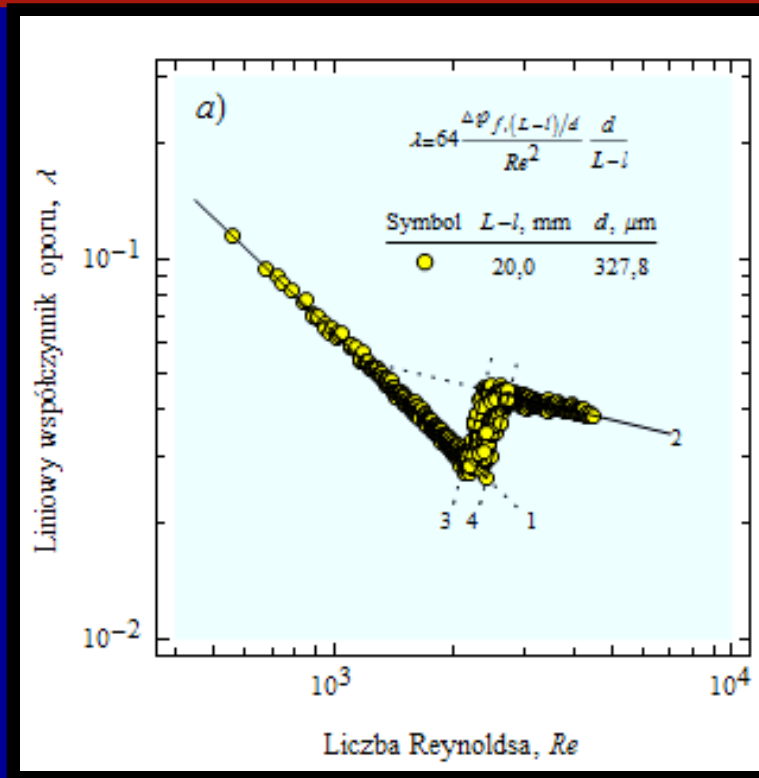
Efekt zaokrąglenia wlotów do mikrorurek (pomiarzy autora)



**Charakterystyki
bezwymiarowe
pary mikrorurek o
średnicy 327,8 μm
(różny stopień
zaokrąglenia
wlotów)**



Redukcja oporów miejscowych

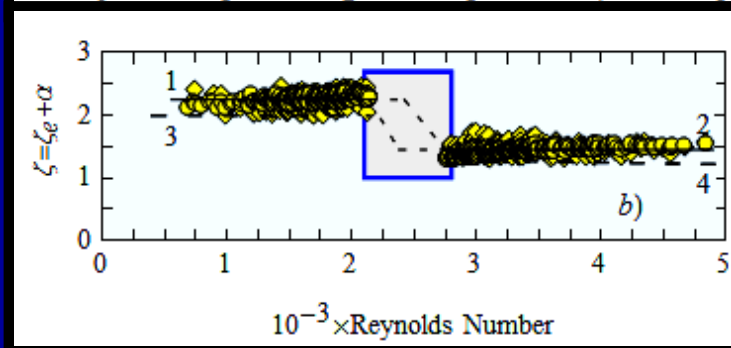
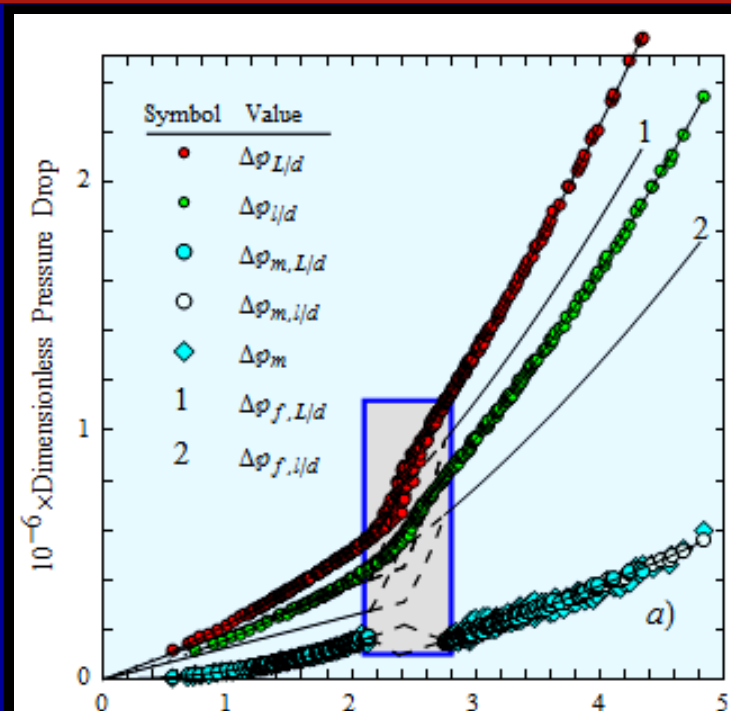


a) Opory skompensowane przez autora

b) Zbyt małe opory w przepływie laminarnym



Opory miejscowe według pomiarów autora



a) **Charakterystyki bezwymiarowe pary ostrokrawędziowych mikrorurek**

o średnicy 327,8 μm

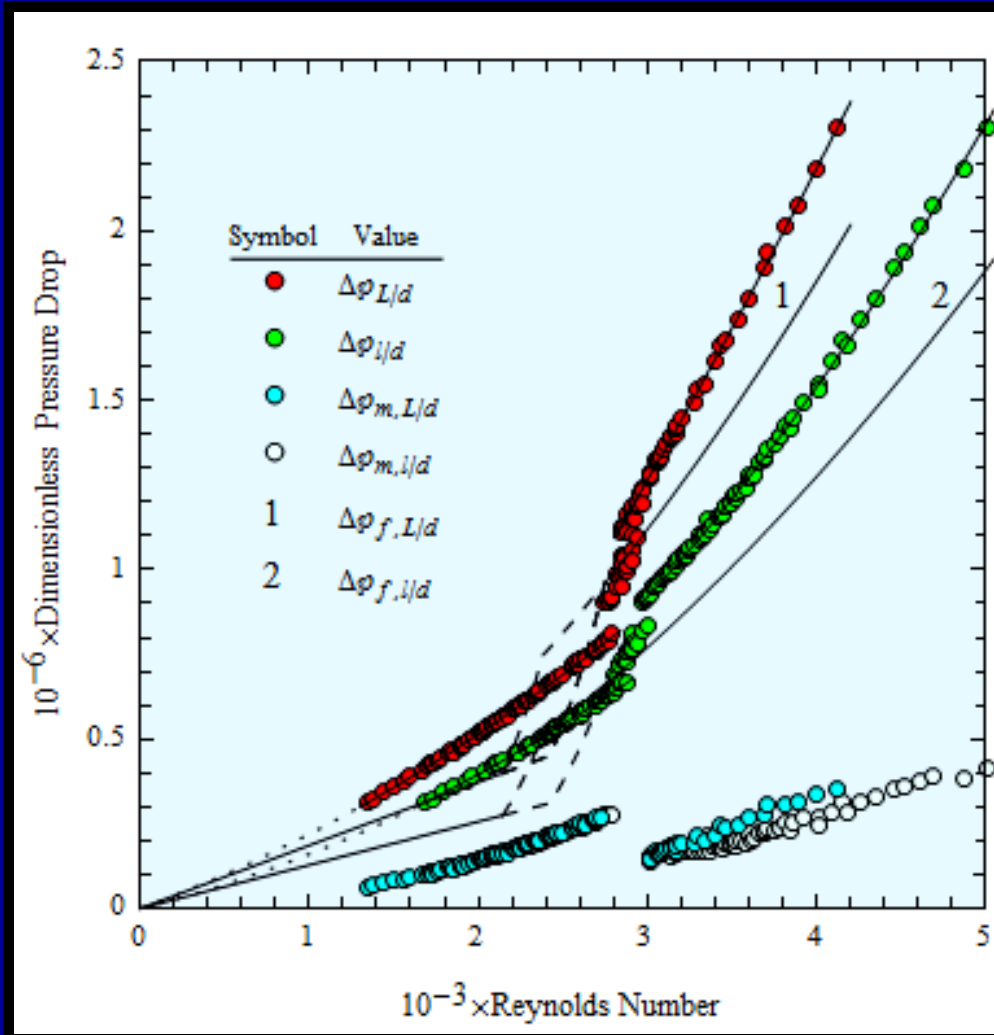
b) **Współczynnik oporów miejscowych pary ostrokrawędziowych mikrorurek**

o średnicy 327,8 μm



Opory miejscowe według pomiarów autora

**Charakterystyki
bezwymiarowe
pary mikrorurek
(327,8 μm)
ze stępienymi
krawędziami
wlotowymi**





Beverley McKeon



Beverley McKeon z Princeton, pomierzyła, wraz z innymi, profile prędkości w gładkiej rurze pracując na ogromnej instalacji SuperPipe (34x1,5 m, powietrze do 20 MPa)

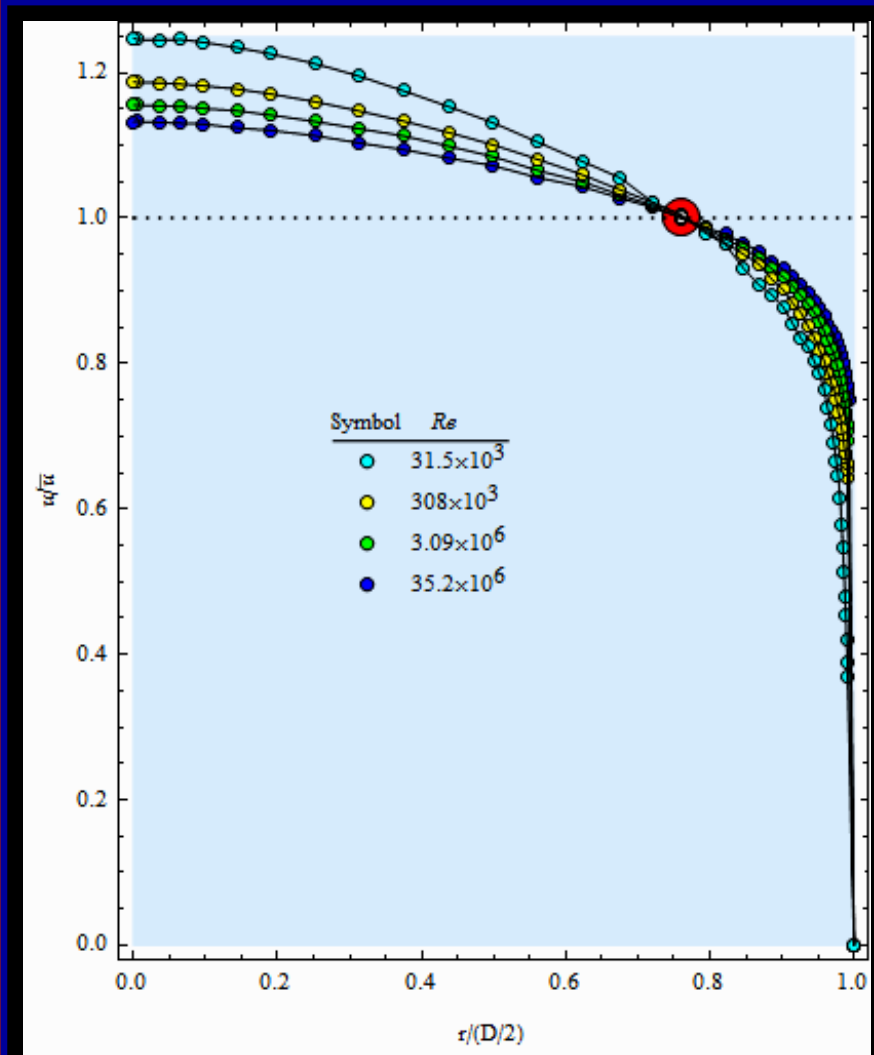


Zespół Beverley McKeon





Współczynniki korekcyjne

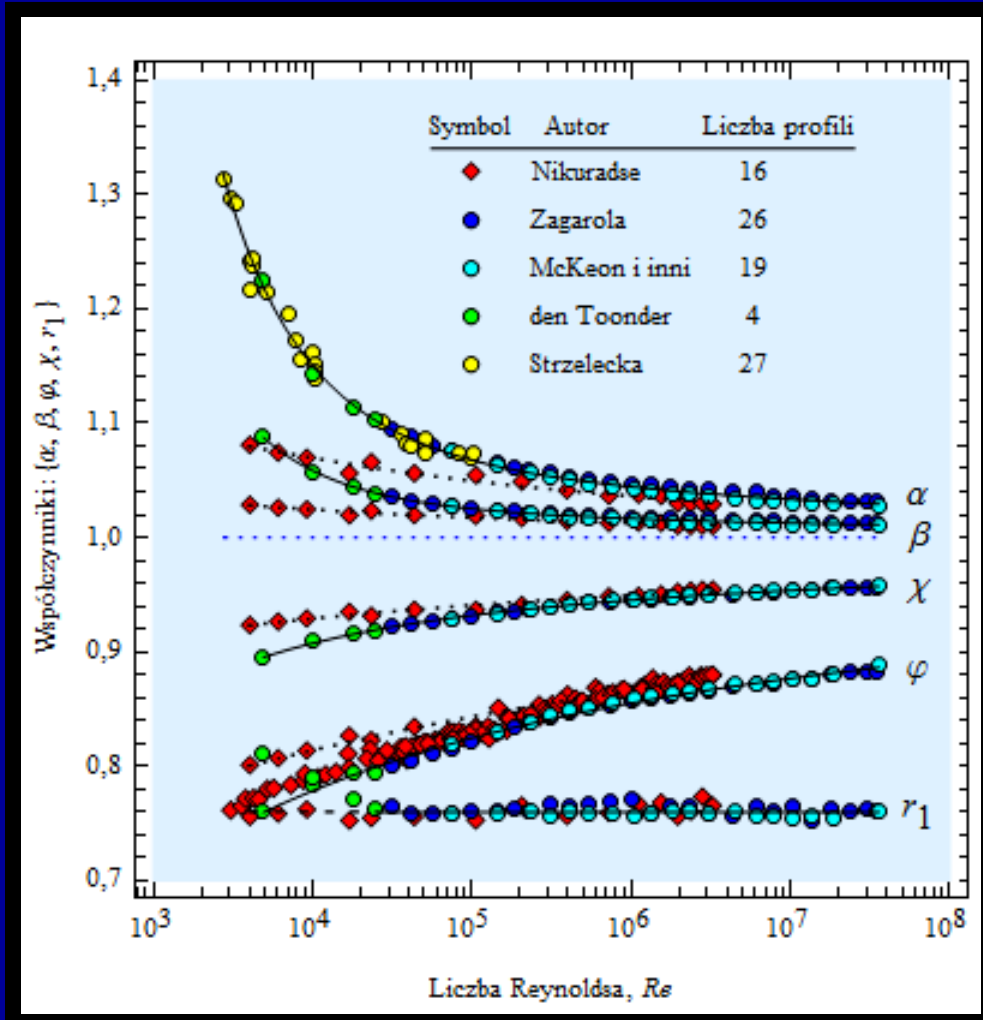


Turbulentne profile prędkości (pomiar: M. Zagarola, obliczenia autora)

Skalowanie wg prędkości średniej, punkt przecięcia (0,760; 1,00)



Współczynniki korekcyjne



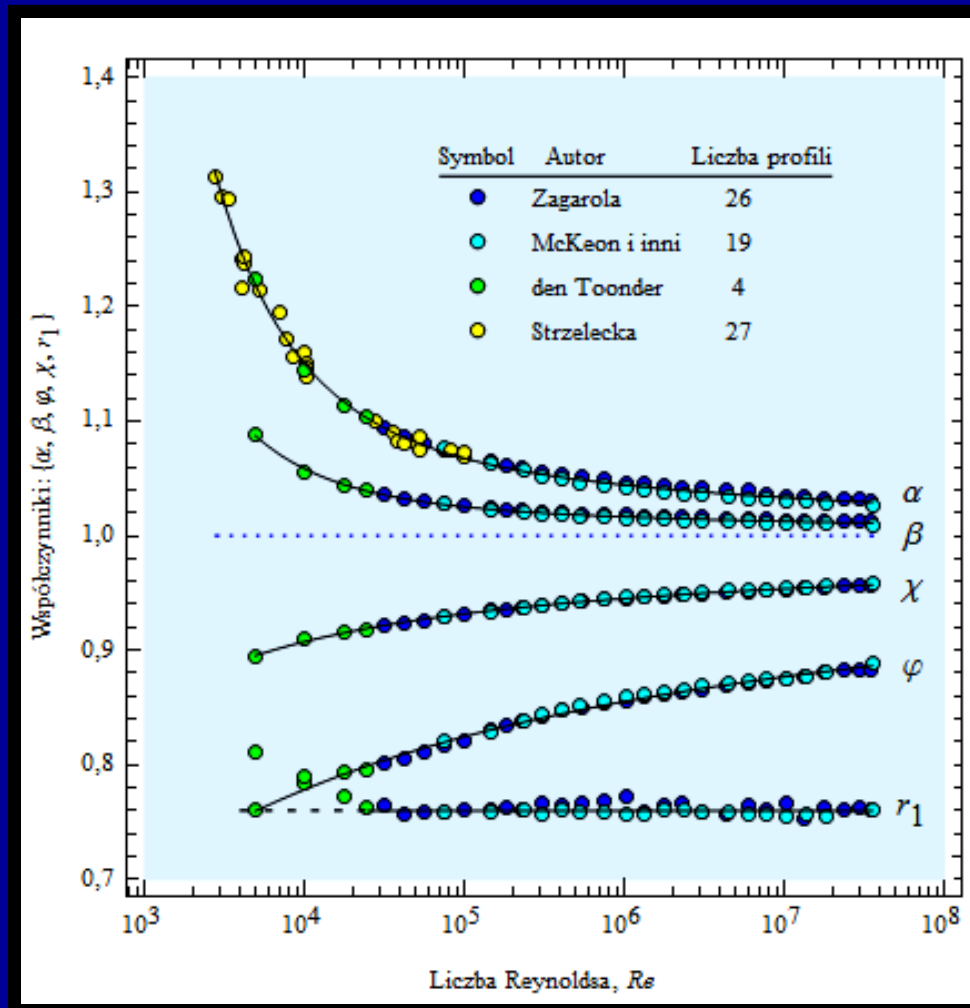
Współczynniki korekcyjne

Obliczenia autora wg współczesnych badań oraz pomiarów Nikuradsego sprzed 75. lat



Współczynniki korekcyjne

Współczynniki korekcyjne



Obliczenia autora wg współczesnych badań 4. różnych autorów (USA, Holandia, Polska)



Podsumowanie wyników prac własnych autora (1)

Badania 2. par minirurek i 5. par mikrorurek (2700 pomiarów), różnej długości względnej w każdej parze, wykazały, że:

- ✓ **Efekty wlotowe można całkowicie skompensować i pośrednio mierzyć średnice oraz lepkość cieczy ($Re \ll 10, 1900$)**
- ✓ **1420 wyników pomiarów potwierdza, że straty liniowe są zgodne z prawem Hagen-Poiseuille'a i wzorem Blasiusa.**



Podsumowanie wyników prac własnych autora (2)

- ✓ Przejście laminarno-turbulentne następuje w przedziale $Re \in [2100, 2800]$ (jeśli wlot do mikrorurki jest ostry)
- ✓ Zaokrąglenie wlotu do mikrorurki powoduje wzrost krytycznej liczby Reynoldsa, która zwiększa się wraz z promieniem zaokrąglenia, ale opór miejscowy zauważalnie wzrasta tylko w przepływie turbulentnym.



Podsumowanie wyników prac własnych autora (3)

- ✓ Współczynnik oporu ζ mikrorurek, z ostrobrzeżnym wlotem, wynosi:
 $\zeta=2,25 \square Re \square 2100 \square \zeta=1,45 \square Re \square [2800, 5000[\square \zeta \square]1,45; 2,25[\square Re \square]2100, 2800[$
- ✓ Najlepszą i pewną metodą wyznaczenia charakterystyk hydraulicznych, w mikroskalowych przepływach płynów nieściśliwych, jest doświadczalne badanie dwu (lub więcej) mikroprzewodów o różnej długości względnej.



Podsumowanie wyników prac własnych autora (4)

W wyniku obliczeń, wykonanych na podstawie pomiarów innych autorów, autor wyznaczył jawne zależności od liczby Reynoldsa czterech ważnych współczynników korekcyjnych, które różnią się znacznie od dotąd znanych z literatury.

Współczynnik Coriolisa jest równy współczynnikowi strat wylotowych; pozostałe współczynniki mają ważne zastosowania praktyczne.



Publikacje stanowiące przedmiot rozprawy habilitacyjnej (PRE nr 14/2008)

4

WYKAZ PUBLIKACJI (ZAŁĄCZNIKÓW)^{*)} STANOWIĄCYCH PRZEDMIOT ROZPRAWY HABILITACYJNEJ

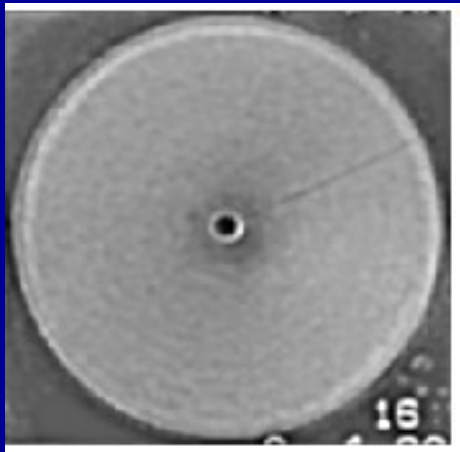
Lp	Nazwa załącznika ^{**)}	Opis bibliograficzny	Strona
1	Z-1	SZEWCZYK H., <i>Correction Factors in One-Dimensional Flow Pattern of a Viscous Incompressible Fluid in a Smooth Circular Pipe</i> , Chem. Proc. Eng., 2008, 29, 271-292.	41
2	Z-2	SZEWCZYK H., <i>Liquid Flow in Smooth Capillary Pipes</i> , Chem. Proc. Eng., 2008, 29, 403-424.	65
3	Z-3	SZEWCZYK H., <i>Laminar-Transitional-Turbulent Liquid Flow in Smooth Capillary Pipes</i> , Chem. Proc. Eng., 2008, 29, 955-977.	89
4	Z-4	SZEWCZYK H., <i>Entrance and End Effects in Liquid Flow in Smooth Capillary Pipes</i> , Chem. Proc. Eng., 2008, 29, 979-996.	115
5	Z0	SZEWCZYK H., <i>Testowanie kapilarnego wiskozymetru kompensacyjnego</i> , Zastosowanie Mechaniki Płynów w Inżynierii i Ochronie Środowiska. Ośme Ogólnopolskie Sympozjum. Materiały Sympozjum, Gliwice, PSI, 2003, 237-242.	135

^{*)} Załączniki Z-1, ..., Z-4 są ułożone chronologicznie. Załącznik Z0 jest publikacją nieperiodyczną o zasięgu krajowym. Stąd jej specjalne oznaczenie i ostatnia pozycja w tabelicy mimo tego, że była ona 1. publikacją autora z 5. pozycyjnego cyklu tematycznego.

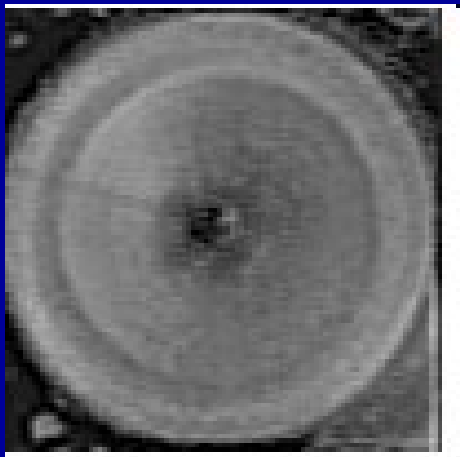
^{**)} Nazwa załącznika jest przywoływana w tekście jeśli cytowane są pozycje z tej tabelicy.



Stożek-płytki



- $Re = 6800$



- $Re = 40000$