



Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Ćwiczenie L2

KRYTYCZNA LICZBA REYNOLDSA

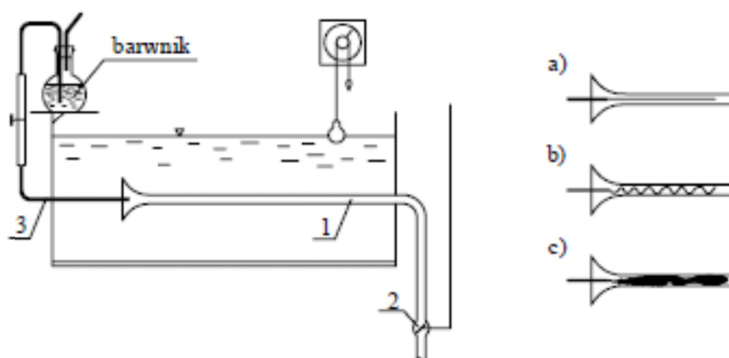
1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie wartości górnej i dolnej krytycznej liczby Reynoldsa oraz obserwacja zjawiska przejścia przepływu laminarnego w turbulentny i odwrotnie.

2. Wstęp teoretyczny

Obserwacje przepływów płynów lepkich wskazują istnienie w przepływach (wewnętrznych i opływach) dwóch odmiennych struktur pola prędkości: jednej – o regularnym przebiegu torów cząstek i drugiej o przebiegu chaotycznie nieregularnym. Charakter ruchu płynów lepkich wyraźnie naświetliły badania Reynoldsa przeprowadzone w 1883 r. na stanowisku pokazanym schematycznie na rysunku 1. Stanowisko składało się z prostego odcinka szklanej rury, w której płynęła woda z regulowanym strumieniem objętości. Obserwując przepływ cieczy w rurze (1) Reynolds stwierdził, że w pewnych zakresach prędkości przepływu wody (regulowanych zaworem (2)), barwnik, doprowadzany cienką rurką (3), płynie wzdłuż osi rury, tworząc prostoliniową smugę (rys. 1a). Przy innych zakresach prędkości barwna smuga zaczyna oscylować (fluktuować), tworząc linię falistą (rys. 1b). Ostatecznie, przy prędkości, zwanej prędkością krytyczną barwna struga traci swoją wyraźną formę i miesza się całkowicie ze strugą główną (rys. 1c). Na podstawie opisanego doświadczenia Reynolds wprowadził podział przepływów na dwa zasadnicze rodzaje:

- laminarne (uwarstwione),
- turbulentne (burzliwe).



Rys. 1. Stanowisko badawcze Reynoldsa

W ruchu laminarnym elementy płynu poruszają się po torach prostych lub łagodnie zakrzywionych, w zależności od kształtu ścian, które nadają kształt wszystkim

liniom prądu. Sprawia to wrażenie, jakby płyn poruszał się warstwami, między którymi nie odbywa się wymiana płynu (stąd nazwa przepływ uwarstwiony). W rzeczywistości wymiana taka nie odbywa się w skali makroskopowej, ale wiadomo, że poszczególne molekuly płynu wykonują bezładny ruch, dzięki któremu zmieniają swoje położenie (dyfuzja molekularna). Stąd w ruchu laminarnym mamy do czynienia z wymianą masy, a z nią i pędu w skali mikroskopowej, co jest przyczyną występowania naprężeń stycznych, określonych wzorem Newtona (1).

$$\tau = \frac{dT}{dA} = \mu \frac{dv}{dn} \quad (1)$$

gdzie: dT – elementarna wartość siły stycznej, dA – elementarne pole podstawy, dn – odległość dwu sąsiednich warstw, dv – zmiana prędkości warstw, μ – dynamiczny współczynnik lepkości.

W przepływie płynu w przewodach zamkniętych pod uwagę brana jest siła bezwładności oraz siła lepkości związane z powstawaniem naprężeń stycznych. Podczas przepływu laminarnego, charakteryzującego się przewagą sił lepkości nad siłami bezwładności, wszelkie powstające przypadkowo zaburzenia są tłumione, zatem przepływ ten jest stateczny (stabilny).

Większość występujących w przyrodzie i interesujących nas pod względem technicznym typów przepływów stanowią przepływy turbulentne. Najbardziej znaną i dominującą cechą tych przepływów jest chaotyczny i nieregularny ruch elementów płynu, wskutek czego wszystkie wielkości, charakteryzujące dany przepływ, wykazują zmienność zarówno w czasie, jak i w przestrzeni. Elementy płynu przemieszczają się zgodnie z głównym kierunkiem transportu masy, wykonując równocześnie nieuporządkowane ruchy fluktuacyjne, poprzeczne w stosunku do kierunku ruchu głównego, wywołujące wymianę masy i pędu między poszczególnymi rurkami prądu. Zachodzi tutaj, w skali makroskopowej, wymiana elementów płynu – zjawisko podobne do mechanizmu tarcia wewnętrznego. Turbulencja jest zatem zjawiskiem charakteryzującym się występowaniem w przepływającym płynie chaotycznych fluktuacji parametrów hydro- i termodynamicznych (prędkości przepływu, ciśnienia, gęstości, temperatury). Przejście ruchu laminarnego w turbulentny następuje wskutek utraty stateczności przepływu laminarnego. Drobne wszechobecne zaburzenia generujące fluktuacje elementów płynu występują zawsze podczas przepływu. W przepływie laminarnym, w którym siła bezwładności jest mała w

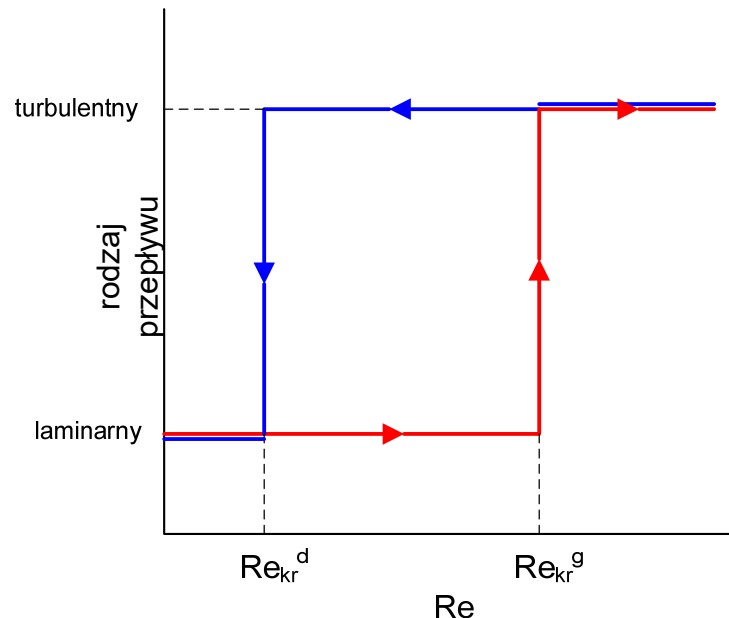
porównaniu z siłą lepkości. Wzrost siły bezwładności, np. wskutek przyrostu prędkości przepływu, powoduje, że tłumiące działanie lepkości jest niewystarczające, co wywołuje utratę stateczności ruchu laminarnego i jego przejście w ruch turbulentny. Zmieniając średnicę d rury oraz prędkość v , Reynolds stwierdził, że stan krytyczny występuje na ogół dla tej samej wartości wyrażenia (2) (nazywanego liczbą Reynoldsa). Liczba ta wyraża stosunek siły bezwładności do siły lepkości (tarcia)

$$Re = \frac{v l}{\nu} \quad (2)$$

gdzie: v – prędkość, l – wymiar charakterystyczny – dla rur o przekroju kołowym wymiarem charakterystycznym jest średnica, ν – kinematyczny współczynnik lepkości.

Określenie wartości Re_{kr} komplikuje fakt, że przejście przepływu laminarnego w turbulentny następuje przy większej wartości liczby Reynoldsa niż proces odwrotny. W związku z tym rozróżnia się dolną krytyczną wartość liczby Reynoldsa Re_{kr}^d (poniżej której nigdy nie występuje ruch turbulentny) i górną krytyczną wartość liczby Reynoldsa Re_{kr}^g (powyżej której nie występuje ruch laminarny), przy czym tylko pierwsza z nich jest dość dokładnie określona, np. w przypadku przepływu przez długą cylindryczną rurę o przekroju kołowym $Re_{kr}^d \approx 2300$ (rys. 2). Górna krytyczna wartość liczby Reynoldsa zależy od wielu czynników, jak np. kształtu wlotu do przewodu, wstępnych zaburzeń mechanicznych płynu wpływającego do przewodu, stopnia gładkości ścian przewodu, drgań przewodu. Wszystkie te czynniki mogą spowodować, że przejście przepływu laminarnego w turbulentny może nastąpić przy różnych wartościach liczby Reynoldsa. Dzięki daleko posuniętej staranności w zachowaniu odpowiednich warunków przepływu udało się utrzymać przepływ laminarny nawet do wartości $Re=80\,000$. Badania eksperymentalne potwierdzają, iż poniżej dolnej krytycznej wartości liczby Reynoldsa przepływ turbulentny nie może się utrzymać. Wprowadzenie sztucznych zaburzeń przez jakiekolwiek elementy zakłócające przepływ lub przez nadawanie ścianom rury drgań wymuszonych nie spowodowało powstania przepływu turbulentnego poniżej dolnej krytycznej wartości liczby Reynoldsa. W miarę jak zwiększamy średnią prędkość przepływu, utrzymanie ruchu laminarnego jest coraz trudniejsze. W momencie, w którym liczba Reynoldsa przekroczy znacznie wartość Re_{kr}^d przejście z ruchu laminarnego w turbulentny występuje nagle i obejmuje całą masę płynu. Fakt ten przypomina zjawiska przekroczenia znane z innych działów fizyki, jak np. zjawiska przechłodzenia lub przegrzania. Należy jednak podkreślić, że w

zagadnieniach technicznych przyjmuje się, iż w zakresie $Re > Re_{kr}^d$ istnieje zawsze przepływ turbulentny, a zatem dla przewodów w przewodach o przekroju kołowym przepływ taki występuje dla $Re > 2300$.



Rys. 2. Przejście z przepływu laminarnego w turbulentny i odwrotnie

Ogólnie przyjmuje się: $Re < 2300$ przepływ laminarny, $Re > 2300$ przepływ turbulentny.

3. Opis stanowiska

Stanowisko pomiarowe składa się z następujących elementów:

- zbiornika zasilającego (1),
- dwóch rur wykonanych z PCV o średnicy - $d_1 = 5,58$ mm z wlotem łagodnym i $d_2 = 5,55$ mm z ostro krawędziowym wlotem (2),
- przewodu zasilającego stanowisko pomiarowe w wodę (3),
- rotametr (4),
- zaworu regulacyjnego (5)
- zbiornika na barwnik (6),
- przewodów doprowadzających barwnik (7) zakończone igłami,
- zaworów odcinających (8,9,10)

4. Procedura badawcza

Zapoznać się z budową stanowiska i sporządzić jego schemat, na którym należy zaznaczyć opisane w pkt. 3 elementy.

Otworzyć zawór (8) w celu doprowadzenia wody z sieci wodociągowej do zbiornika zasilającego (1). Zbiornik (1) jest zabezpieczony przed przepełnieniem, nadmiar wody jest odprowadzany upustem. Badania należy przeprowadzić na dwóch przewodach o średnicach i kształtach części wlotowych opisanych w punkcie 3. W pierwszej kolejności przeprowadzić badania w rurze górnej o średnicy $d_1=5,58\text{mm}$ i wlocie łagodnym. W tym celu otworzyć zawór (9) i jednocześnie sprawdzić czy zawór (10) jest zamknięty. Przepływ wody w badanej rurze uzyskuje się przez otwarcie zaworu regulacyjnego (5) rotametu (4). Po otwarciu zaworu (4) należy doprowadzić ciecz barwną ze zbiornika (6) przewodem (7) zakończonym igłą do wlotu badanego przewodu (2). Należy zwrócić uwagę, że jeżeli został odkręcony zawór doprowadzający barwnik do przewodu, to w takim przypadku nigdy nie wolno zakręcać całkowicie zaworu regulacyjnego (5) rotametu. W momencie całkowitego zamknięcia tego zaworu barwnik zabrudzi wodę w zbiorniku (1).

W pierwszej kolejności zbadać przejście przepływu laminarnego w przepływ turbulentny (górną krytyczną liczbą Reynoldsa) a następnie przejście przepływu turbulentnego w przepływ laminarny (dolną krytyczną liczbą Reynoldsa). W tym celu otwieramy powoli zawór regulacyjny (5) i obserwujemy zachowanie barwnej stróżki. W fazie początkowej mamy do czynienia z przepływem laminarnym, o czym świadczy kształt strugi – linia prosta. Zawór regulacyjny cały czas powoli otwieramy obserwując zachowanie się barwnej strugi. W momencie zaobserwowania utraty stateczności przez barwną stróżkę odczytujemy z rotametu (4) wartość strumień objętości i zapisujemy ją w protokole pomiarowym. W celu przeprowadzenia pomiaru przejścia przepływu turbulentnego w przepływ laminarny (dolną krytyczną liczbą Reynoldsa) odkręcamy maksymalnie zawór regulacyjny (5). Następnie powoli go zamykamy obserwując zachowanie się barwnej stróżki. W chwili uzyskania przez stróżkę kształtu linii prostej odczytujemy z rotametu (4) wartość strumień objętości i zapisujemy ją w protokole pomiarowym. Badanie przejścia przepływu laminarnego w turbulentny i turbulentnego w laminarny dokonujemy po 10 razy.

W celu przeprowadzenia badania przejścia przepływu laminarnego w turbulentny i turbulentnego w laminarny przewodu dolnego o średnicy wewnętrznej $d_2=5,55\text{mm}$ i

wlocie o kształcie ostro krawędziowym należy otworzyć zawór (11) i zamknąć zawór (10). Do badań wykorzystać procedurę badawczą opisaną dla przewodu górnego.

5. Tabela wielkości mierzonych

Tabela wielkości pomiarowych do tego ćwiczenia zamieszczona jest na końcu instrukcji. Tabelę należy uzupełnić o jednostki wielkości mierzonych.

6. Opracowanie wyników pomiarów

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów wyznaczyć dolną i górną krytyczną liczbę Reynoldsa dla każdego z punktów pomiarowych. Dla każdego z przewodów wyznaczyć średnią liczbę Re. Liczbę Reynoldsa obliczyć na podstawie równania:

$$Re = \frac{4q_v}{\pi d v}$$

7. Pytania kontrolne

- 1) Co to jest przepływ laminarny?
- 2) Co to jest przepływ turbulentny?
- 3) Od jakich parametrów zależy liczba Reynoldsa?
- 4) Jakie siły występują w liczbie Reynoldsa?
- 5) Jakie siły przeważają podczas przepływu laminarnego?
- 6) Jakie siły przeważają podczas przepływu turbulentnego?
- 7) Dlaczego górna krytyczna liczba Reynoldsa jest nieokreślona
- 8) Kiedy mamy do czynienia z dolną i górną krytyczną liczbą Reynoldsa

Tabela pomiarowa do ćwiczenia L2

Data wykonania pomiarów:

Lp.	$d_1=5,58 \text{ mm}$		$d_2=5,55 \text{ mm}$	
	q_v	q_v	q_v	q_v
	laminarny→ turbulentny	turbulentny→ laminarny	laminarny→ turbulentny	turbulentny→ laminarny
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				
8.				
9.				
10.				

Warunki pomiaru i wielkości stałe

Symbol	Jednostka	Wartość
T	°C	
d_1	mm	5,58
d_2	mm	5,55

Sekcja nr

Lp.	Nazwisko	Imię	Nr albumu
1.			
2.			
3.			

Data, podpis prowadzącego