

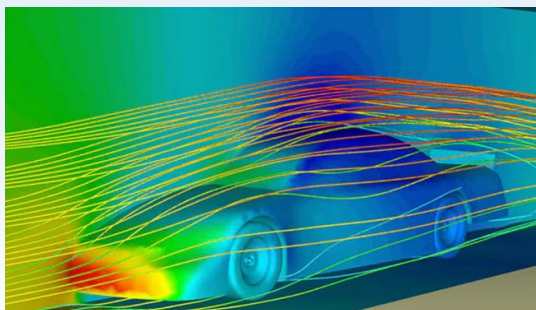
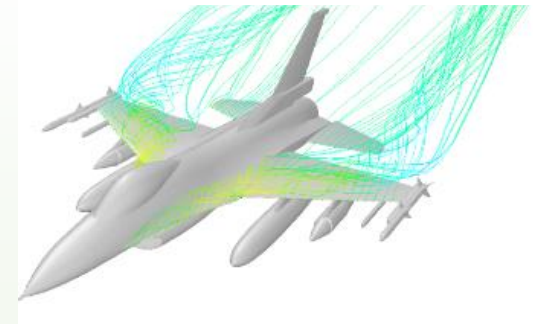
WYKŁAD 1
AERODYNAMIKA
STRUKTUR URBANISTYCZNYCH



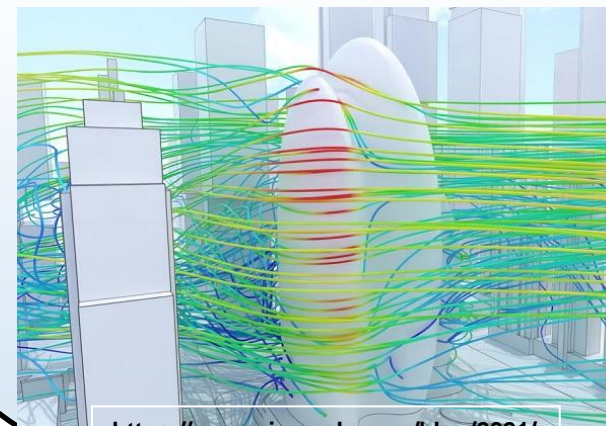
**WPROWADZENIE W TEMATYKĘ ZAGADNIENÍ AERODYNAMIKI
BUDYNKÓW**

Aerodynamika –
dział mechaniki płynów
zajmujący się przepływami
gazów (gł. powietrza) i
oddziaływaniami sił między
gazem a obiektem
poruszającym się względem
niego.

http://www.mechanik.media.pl/pliki/do_pobrania/artykuly/2/4917_165_176.pdf



<https://autokult.pl/5329,jakie-sily-oporu-dzialaja-na-samochod-podczas-jazdy>



<https://www.simscale.com/blog/2021/02/building-simulation/>

CEL STOSOWANIA BADAŃ Z DZIEDZINY AERODYNAMIKI W PROJEKTOWANIU URBANISTYCZNYM I ARCHITEKTONICZNYM:

- **Zapewnienie komfortu wiatrowego w różnych skalach przestrzeni zamieszkania**
 - **Lokalizacja obiektów uciążliwych (np. przemysł, biogazownie)**
 - **Przewietrzanie miasta – ochrona przed przegrzewaniem, usuwanie zanieczyszczeń**
 - **Ochrona przed gwałtownymi porywami wiatru**

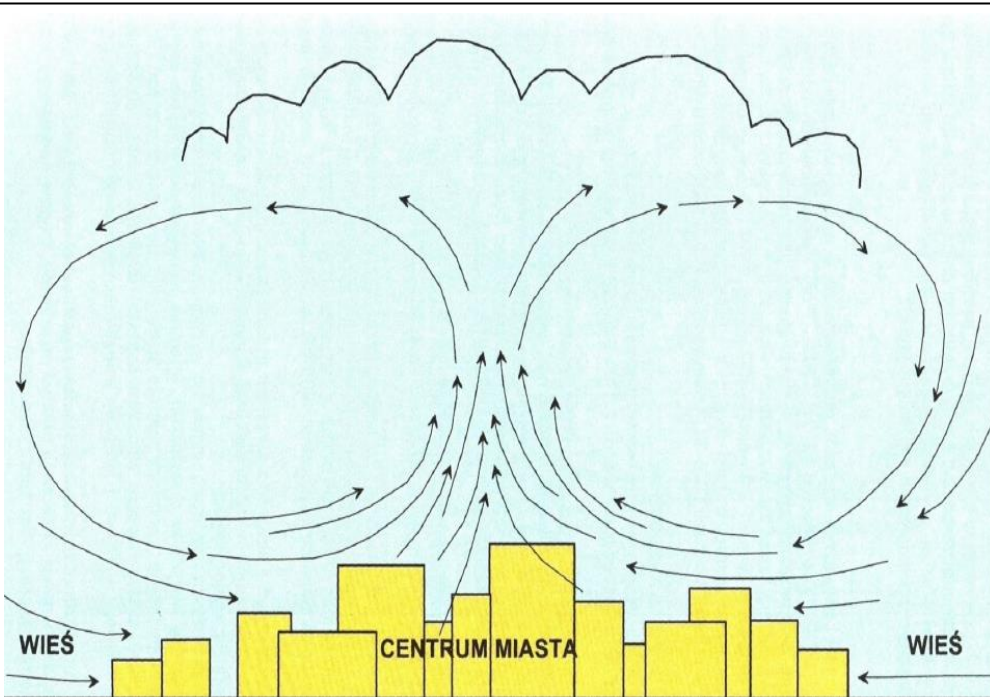
- **Badania w zakresie obciążeń budynków wiatrem, optymalizacja – forma, konstrukcja, elementy elewacji**

- **Pozyskiwanie energii wiatrowej**

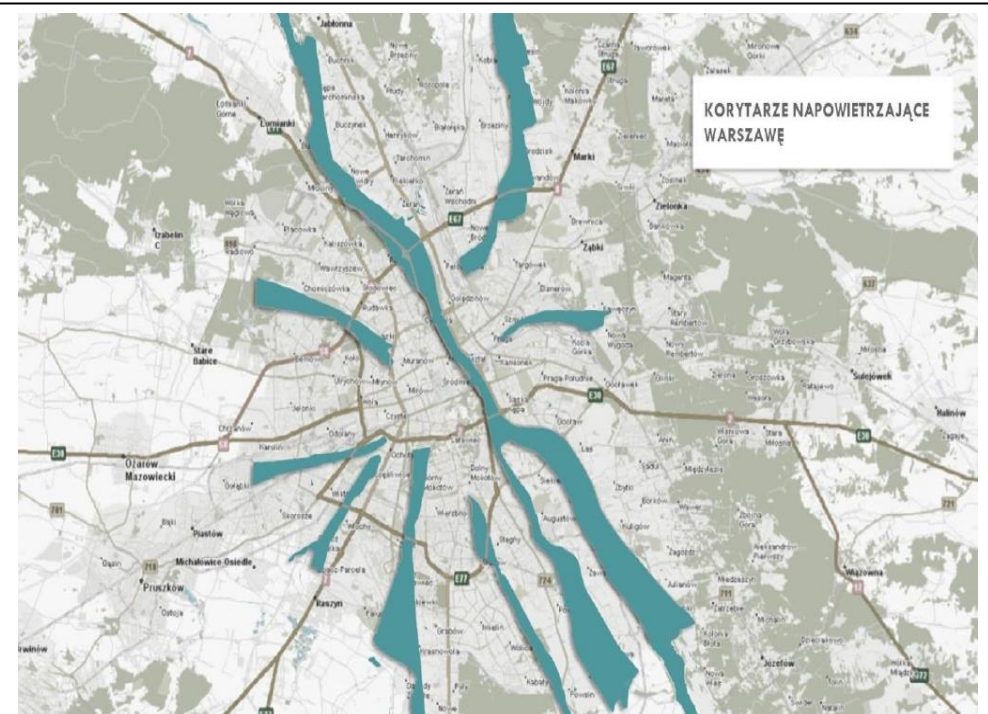
- **Wentylacja budynków**

- **Dyspersja zanieczyszczeń w środowisku miejskim**

PRZEWIETRZANIE MIASTA



Cyrkulacja bryzowa pomiędzy miastem a terenami zewnętrznymi: źródło J. Lewińska



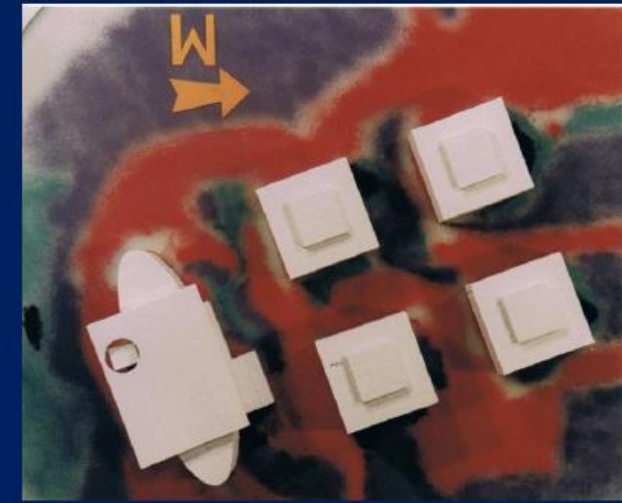
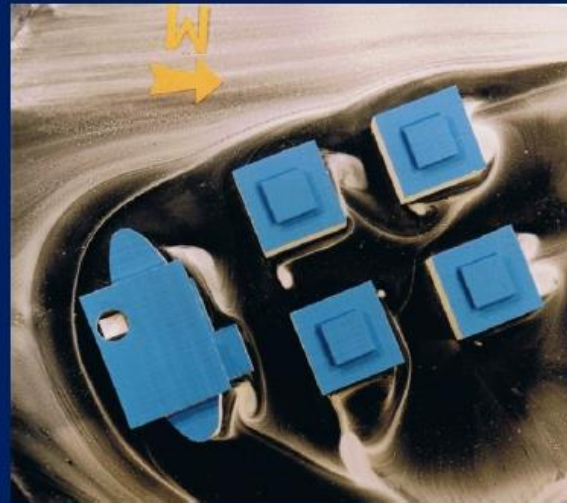
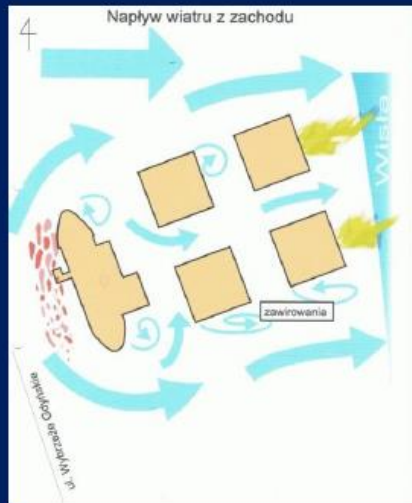
Układ korytarzy napowietrzających Warszawę: wg Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Warszawy

PRZEWIETRZANIE MIASTA

Wymagania dotyczące formowania zabudowy w korytarzach napowietrzających:

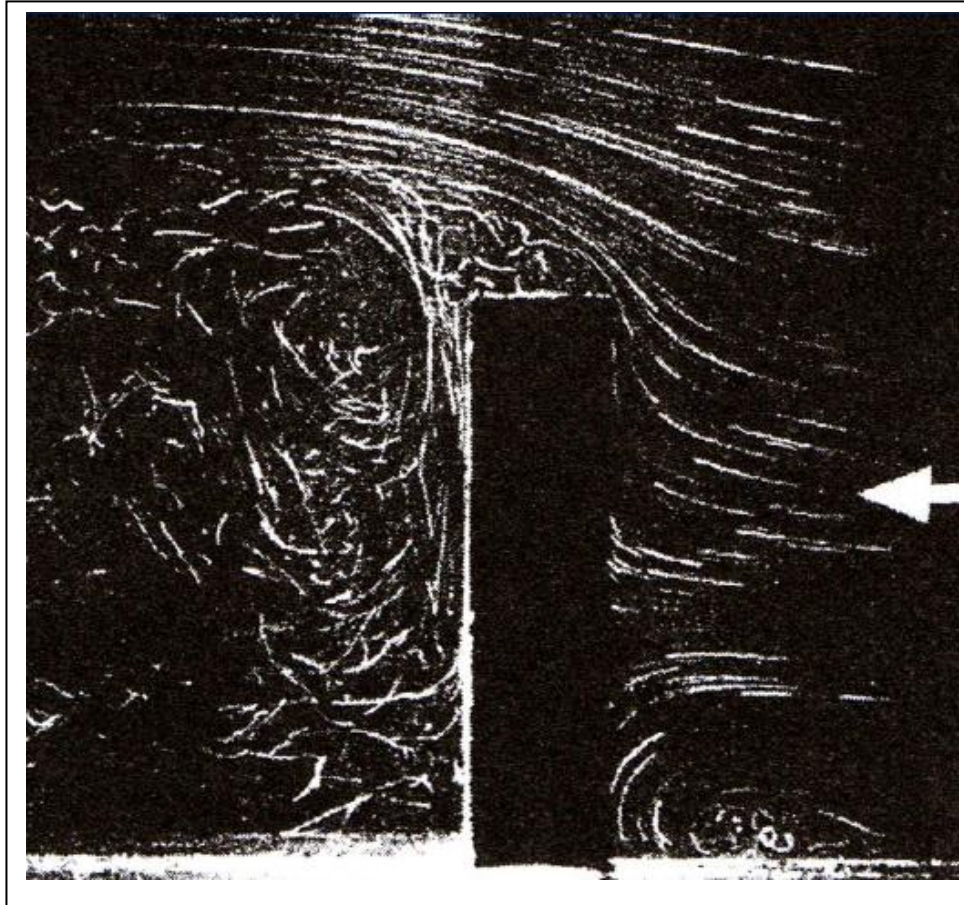
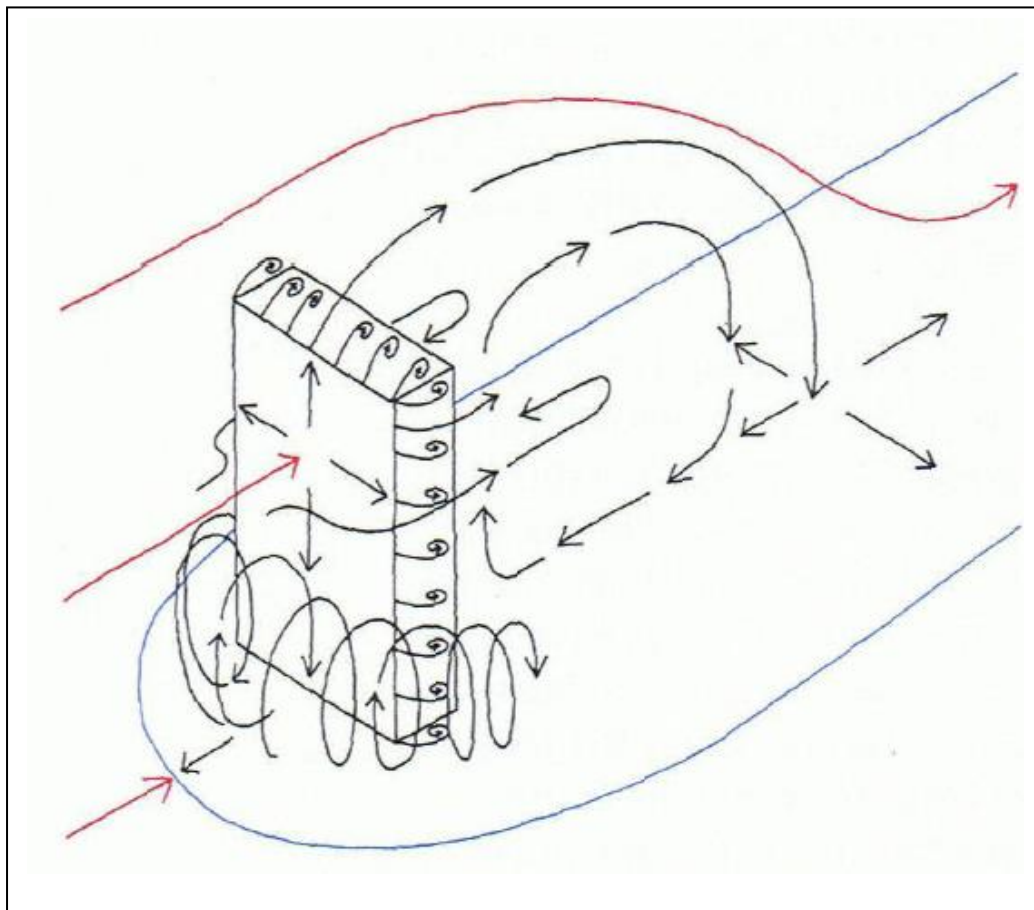
- zabudowa mało intensywna i rozproszona,
- budynki o podłużnych planach sytuowane wzdłuż biegu korytarza
- najkorzystniejsze formy – centralne, opływowe, o mało rozległym planie
- zieleń wysoka nie powinna tworzyć zwartych grup
- zabudowa krawędzi korytarza – zbyt zwarta zabudowa i wysoka zieleń może niepotrzebnie przyspieszać wiatr i blokować jego swobodne przenikanie w głąb terenów miejskich

PRZEWIETRZANIE MIASTA



Badania zabudowy zlokalizowanej w korytarzach napowietrzających Warszawy - Centrum Olimpijskie (powyżej), osiedle Marina Mokotów (obok). Ekspertyzy wykonano w Zakładzie Aerodynamiki MEiL PW.

KOMFORT WIATROWY WOKÓŁ BUDYNKÓW



Schemat opływu bryły prostopadłościennej, szkic i fotografia wizualizacji, wg K. Daniela i E. Błazik - Borowej

KOMFORT WIATROWY WOKÓŁ BUDYNKÓW

Główne zadania badawcze:

- zmniejszenie wpływu uciążliwych podmuchów wiatru
- zminimalizowanie obszarów nieprzewietrzanych, gdzie zbierają się zanieczyszczenia i uciążliwe zapachy
- odpowiednie rozlokowanie w budynku okien, drzwi, bram i otworów z wentylacji
- przewidzenie efektów akustycznych spowodowanych drganiami itp

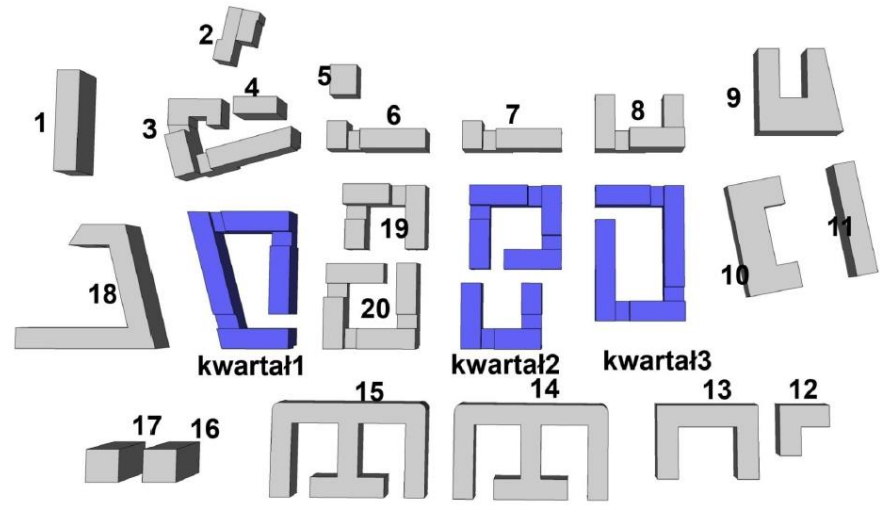


<https://www.wur.nl/en/newsarticle/The-urban-wind-island-effect.htm>



Photo by The Asahi Shimbun via Getty Images)

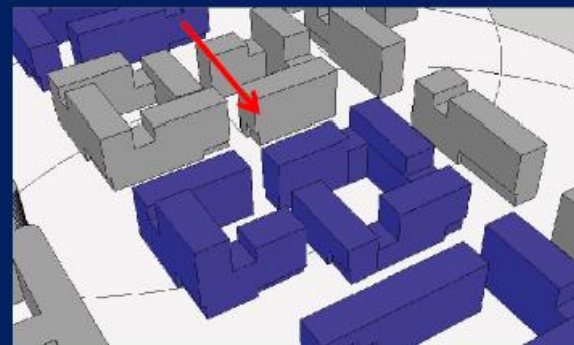
KOMFORT WIATROWY WOKÓŁ BUDYNKÓW



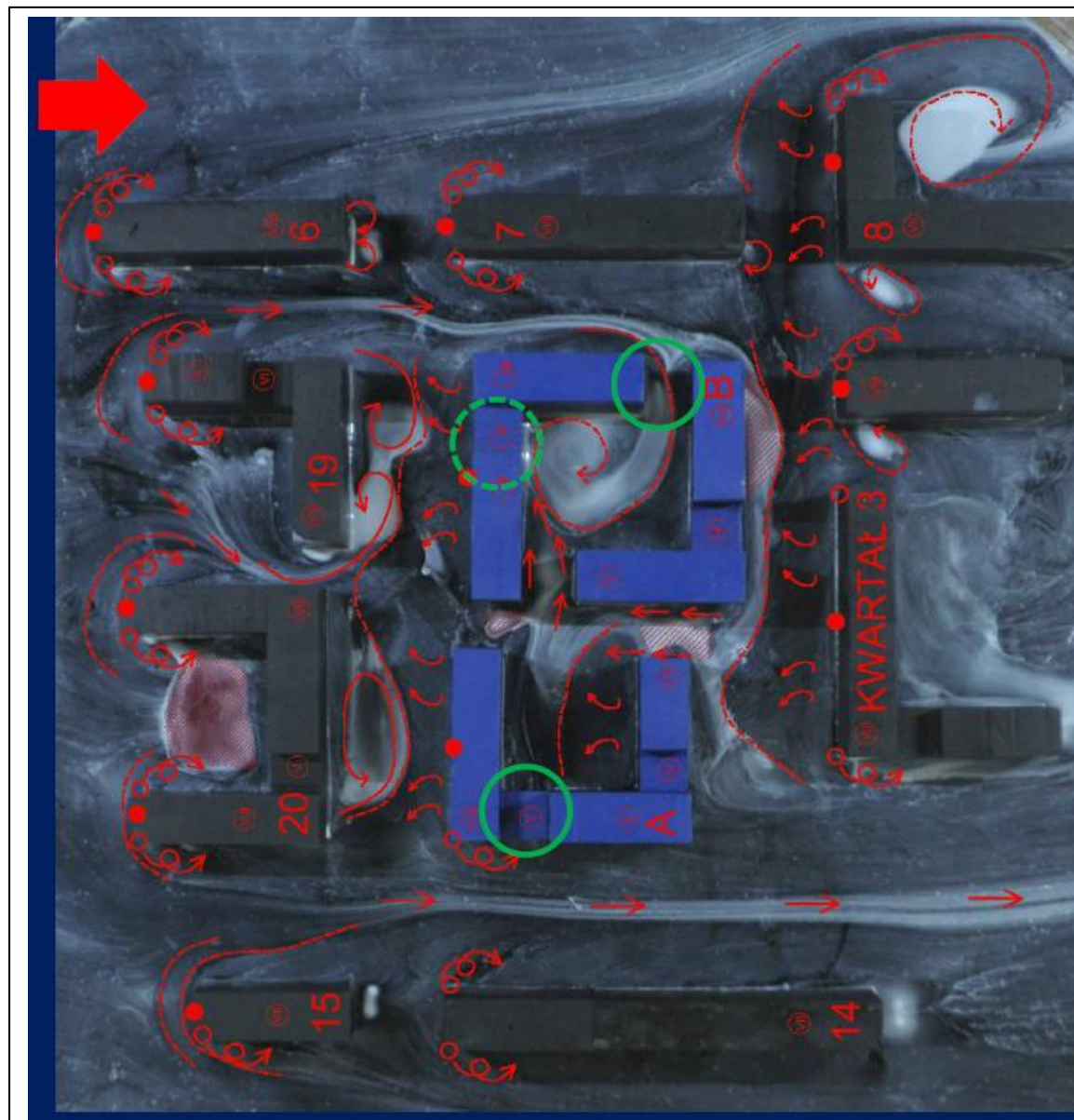
KOMFORT WIATROWY WOKÓŁ BUDYNKÓW

wariant 1

Wizualizacja opływu powietrza wokół przykładowego kwartału zabudowy w Warszawie, badania tunelowe metodą olejową; zespół badawczy: K. Zielonko -Jung, M. Poćwierz, studenci seminarium magisterskiego WAPW



KOMFORT WIATROWY WOKÓŁ BUDYNKÓW



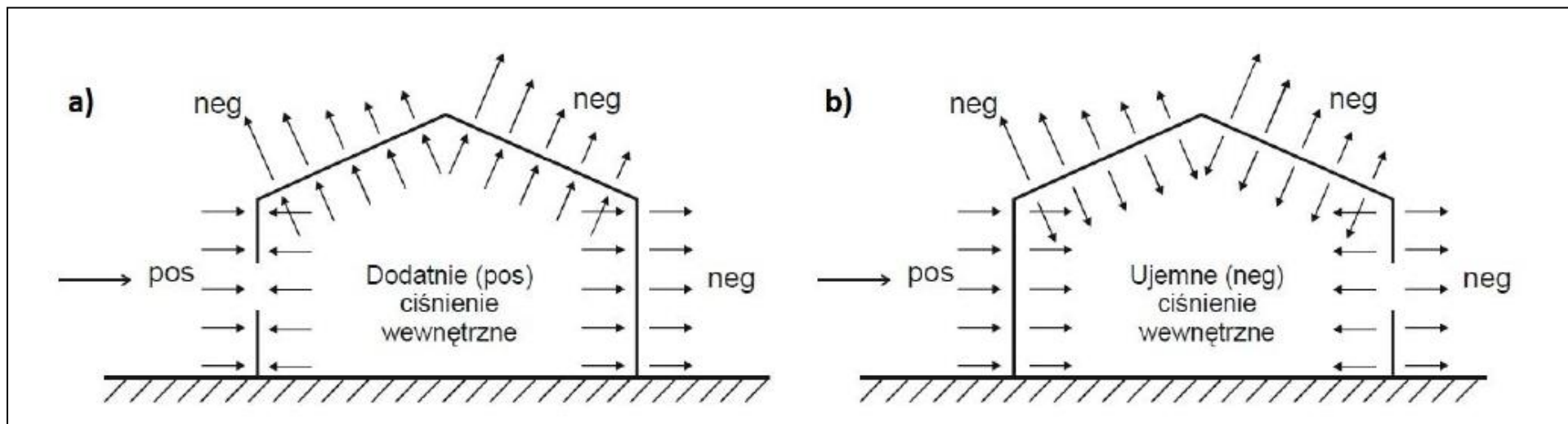
variant 2
otwarcie+brama



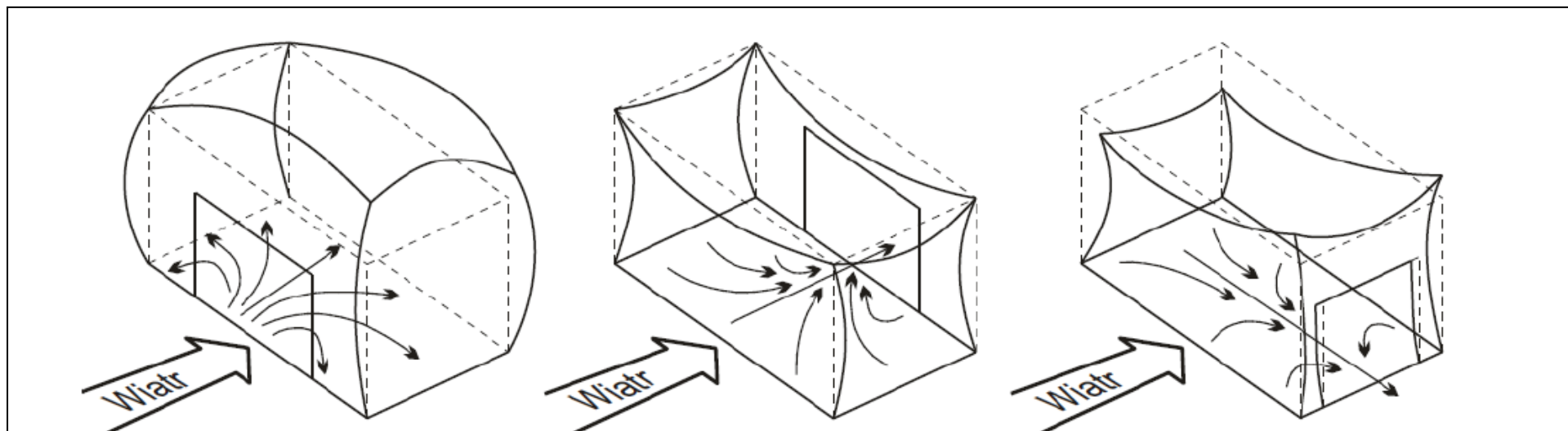
variant 1

BADANIA OBCIĄŻENIA KONSTRUKCJI WIATREM

Pole ciśnienia działające na budynek



Charakter deformacji budynku z otworem w ścianie zewnętrznej nawietrznej, zawietrznej i bocznej



BADANIA OBCIĄŻENIA KONSTRUKCJI WIATREM

Rodzaje ruchu budynku pod wpływem wiatru:

- ruch wzdłużny – w kierunku wiatru, wynika z działania ciśnień i ich fluktuacji na nawietrzną i zawietrzną ścianę budynku
- ruch poprzeczny – w kierunku prostopadłym do ruchu wiatru, wynika z różnicy ciśnień na ścianach bocznych
- ruch skręcający – występuje gdy siły wzdłużne lub poprzeczne nie działają na tej samej linii
- ruch drgający, wynikający ze zjawiska odrywania się wirów za budynkiem, szczególnie odczuwalny w budynkach wysokościowych



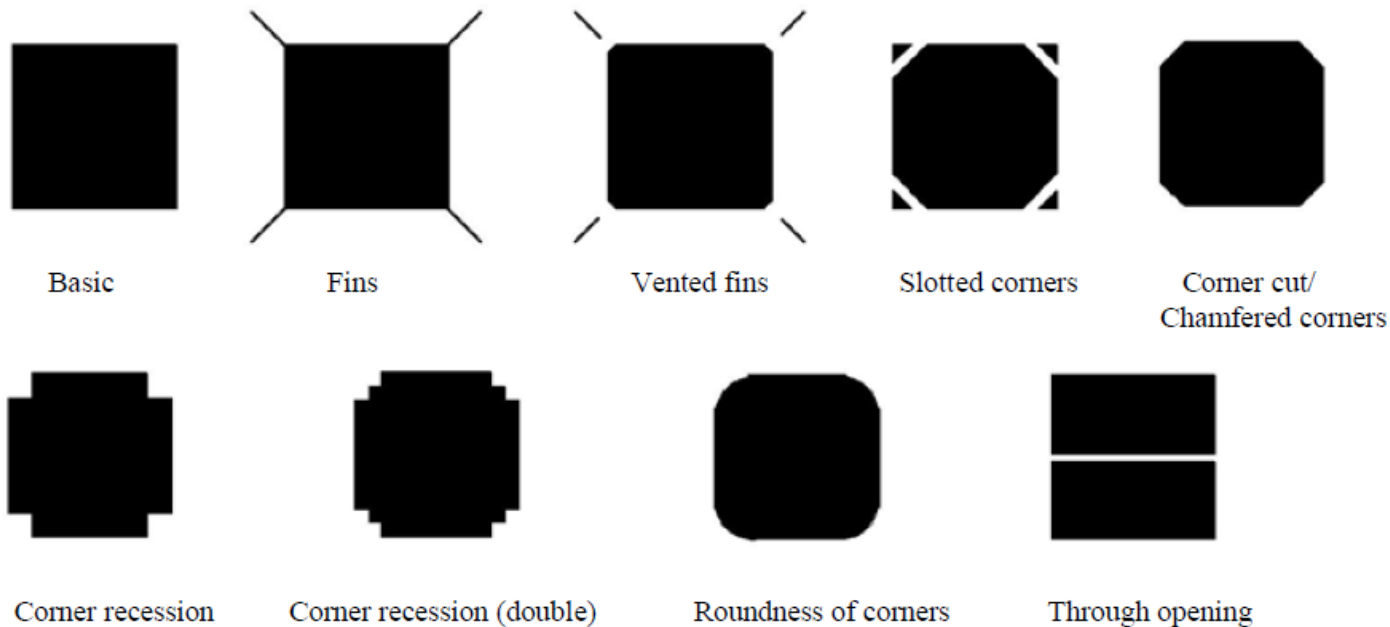
(regularnie rozmieszczone wiry generują swoje największe siły prostopadle do kierunku przepływu, powodując drgania przy wietrze bocznym)

BADANIA OBCIĄŻENIA KONSTRUKCJI WIATREM

Redukcja obciążeń wiatrem poprzez modyfikacje architektoniczne

Siła wiatru bocznego jest związana z geometrią planu budynku, jak również ze zmianą geometrii w zależności od wysokości. Najbardziej podatne na ruchy wywołane wiatrem bocznym są budynki bardzo pryzmatyczne, które wykazują niewielką zmienność kształtu planu wraz z wysokością.

Strategie redukujące te ruchy wywołane wiatrem obejmują zwężanie konstrukcji i zmianę formy planu wraz z wysokością. Zmiany formy planu mogą polegać na zmianie geometrii narożników budynku lub wprowadzeniu otworów w konstrukcji.



BADANIA OBCIĄŻENIA KONSTRUKCJI WIATREM

**Redukcja obciążeń wiatrem poprzez modyfikacje architektoniczne –
zmniejszenie przekroju poprzecznego wraz z wysokością**



Piramida Transamerica w
San Francisco – 260m



Barj Dubaj Tower -
421m



Sears Tower w Chicago
442,3 m (ponad 500 z antenami)

BADANIA OBCIĄŻENIA KONSTRUKCJI WIATREM

Kształty zmniejszające względną amplitudę drgań badanego obiektu - pozwalają uniknąć jednoczesnego zrzucania wirów na całej wysokości budynku.



Kingdom Center – Rijadh
Arabia Saudyjska



Chicago Spire



Shanghai Center

OPTYMALIZACJA FORMY BUDYNKU

<https://cudaswiata.wordpress.com/2009/03/06/30-st-mary-axe-swiss-re/>



30 St Mary Axe (Swiss Re) w Londynie

- **Kształt budynku jest taki, by przepływ wokół niego był gładki i bez oderwań.**
- **Zminimalizowane jest obciążenie na pokrycie i strukturę budynku**
- **Zewnętrzna różnica ciśnień wykorzystywana jest przy naturalnej wentylacji**
- **Atria wewnątrz budynku – pomagają rozprowadzać powietrze zasysane przez otwory w fasadzie**
- **Zastosowane w budynku rozwiązania pozwalają na 50-proc. redukcję zużycia energii w stosunku do zwykłych wieżowców**

OPTYMALIZACJA FORMY BUDYNKU

<https://www.glasgowsciencecentre.org/discover/our-experiences/glasgow-tower>

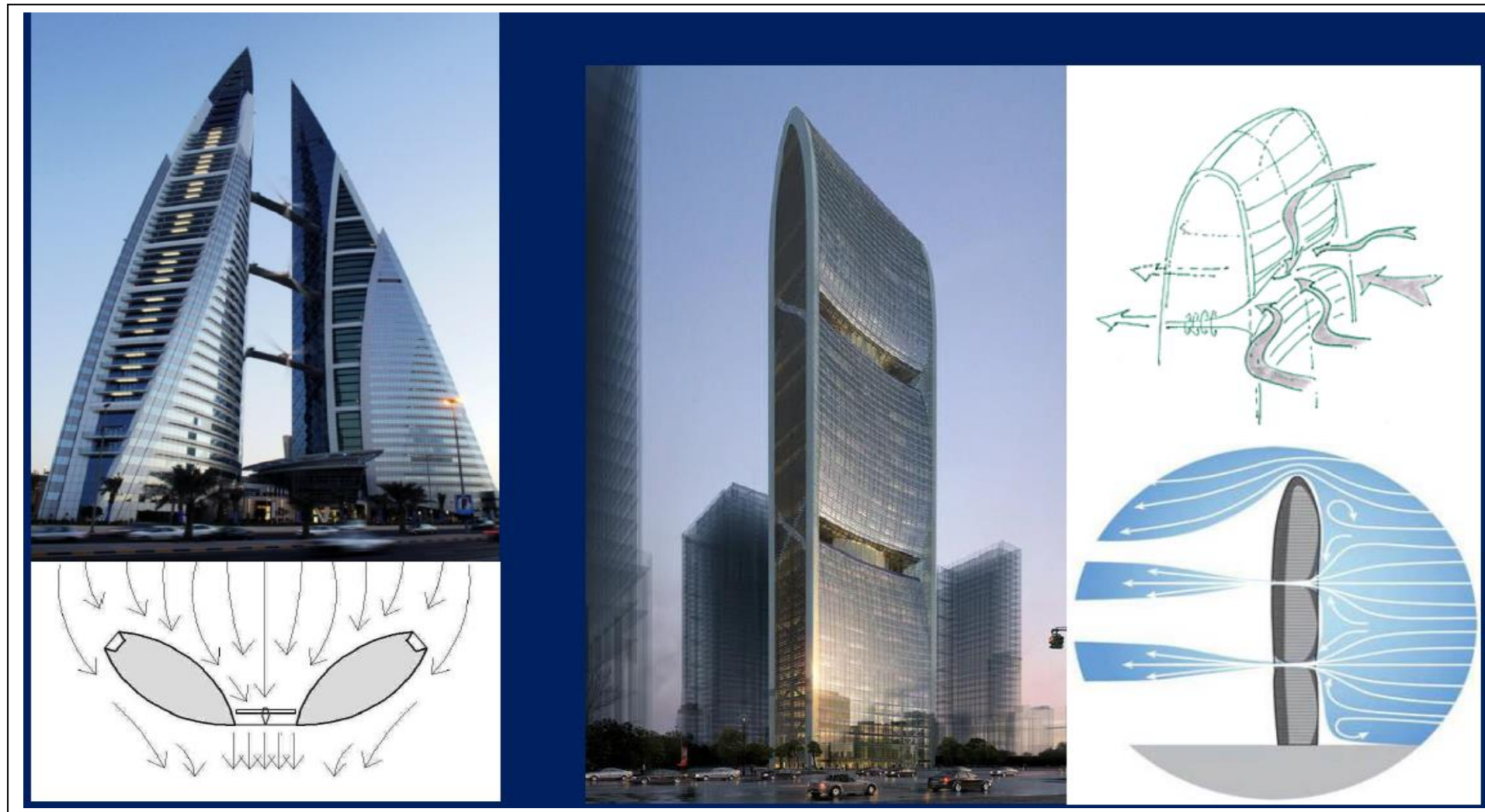


**Glasgow Wing Tower - część
Glasgow Science Center**

Optymalizacja cech aerodynamicznych budynku

- Wieża jest pionowo ustawionym skrzydłem zwracającym się w kierunku wiejącego wiatru.
- Celem projektantów było zmniejszenie siły oporu czyli siły działającej wzdłużnie do kierunku wiatru jak również wybór takiego kształtu, który znacznie zredukuje drgania poprzeczne budowli.
- Konstrukcja zewnętrzna zapewnia sztywność konstrukcji

POZYSKIWANIE ENERGII WIATROWEJ

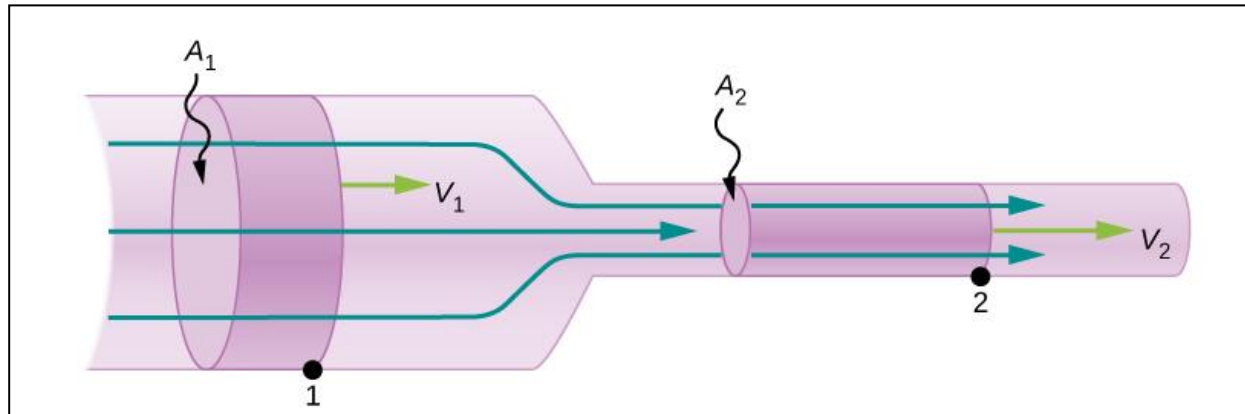


**Bahrain World Trade Center w Manamie , Bahrain (po lewej) , proj. Atkins; źródło: www.bahrianwtc.com.
Pearl River Tower w Guangzhou, Chiny (po prawej), proj. Skinmore, Owings and Merrill; źródło:
www.som.com**

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Równanie ciągłości – wynika z prawa zachowania masy

<https://cnx.org/contents/TqqPA4io@5.93:z5i9jkDy@4/14-5-Dynamika-p%C5%82yn%C3%B3w>



$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

$$\text{gdy } \rho_1 = \rho_2 \rightarrow v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Tam gdzie większy przekrój płyn płynie wolniej a tam gdzie przekrój mniejszy płynie szybciej!

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Równanie ruchu dla płynu idealnego

RÓWNANIE EULERA opisuje ruch płynu o uproszczonych własnościach. Siła powierzchniowa została określona tak samo w ruchu jak i w spoczynku: nie posiada składowych stycznych, a składnik ciśnieniowy jest w niej dominujący

$$\frac{dv_i}{dt} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

The diagram illustrates the components of the Euler equation. A central box contains the equation $\frac{dv_i}{dt} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$. Three arrows point from boxes below to the equation: one from the left box to the $\frac{dv_i}{dt}$ term, one from the middle box to the F_i term, and one from the right box to the $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$ term.

pole przyspieszenia

pole sił objętościowych

pole sił wynikające z niejednorodności ciśnienia

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Równanie Bernoulliego –

jest jedną z całek równania Eulera otrzymaną przy następujących założeniach:

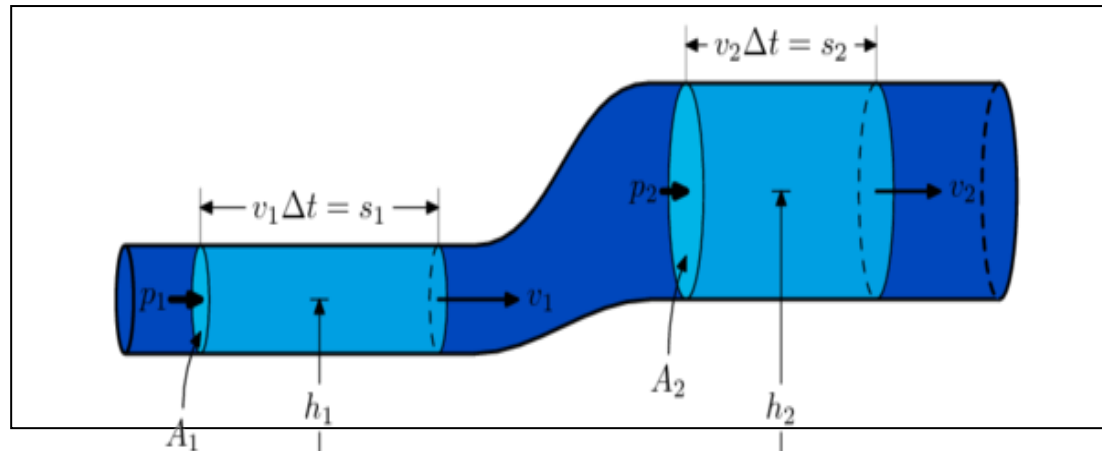
- przepływ jest ustalony (stacjonarny), tj. żadna z wielkości przepływowych nie zależy jawnie od czasu**
- pole sił objętościowych jest polem potencjalnym (spełniającym warunek: $F = - \text{grad } \Phi$)**
- płyn jest barotropowy, tzn jest to płyn, którego gęstość jest funkcją ciśnienia**

Rozważmy sytuację, w której płyn znajduje się w polu grawitacyjnym i ma stałą gęstość

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Zmiana energii kinetycznej płynu znajdującego się w danej chwili w obszarze strugi związana jest ze zmianą energii potencjalnej i pracą wykonaną przez siły zewnętrzne, wynikające z różnicy ciśnień.

https://pl.wikipedia.org/wiki/Mechanika_plyn%C3%B3w



$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Gdy, przepływ ma charakter stacjonarny (niezmienny w czasie), ciecz jest nielepka i nieściśliwa wówczas suma tych trzech składników jest stała wzdłuż linii prądu.

Gdy wysokość płynącego płynu nie zmienia się to jego energia potencjalna jest stała a równanie możemy zapisać:

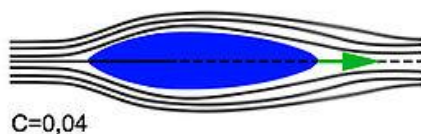
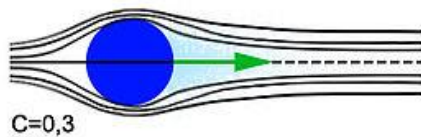
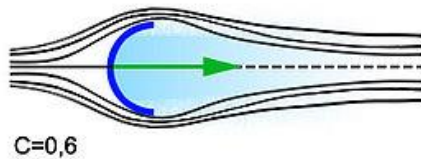
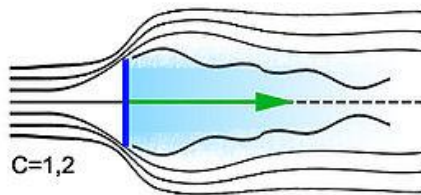
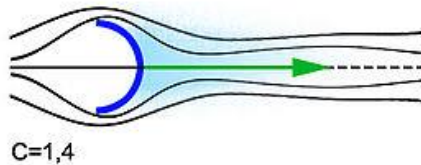
$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

Jako zmienne pozostają energia kinetyczna i praca wykonana przez ciśnienie. Jeśli jedno z nich rośnie to drugie maleje czyli np.

Gdy prędkość płynu rośnie, jego ciśnienie maleje!

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Linie prądu



https://pl.wikipedia.org/wiki/Linia_prądu

Linia prądu – linia styczna w każdym punkcie do kierunku prędkości cząstki płynu .

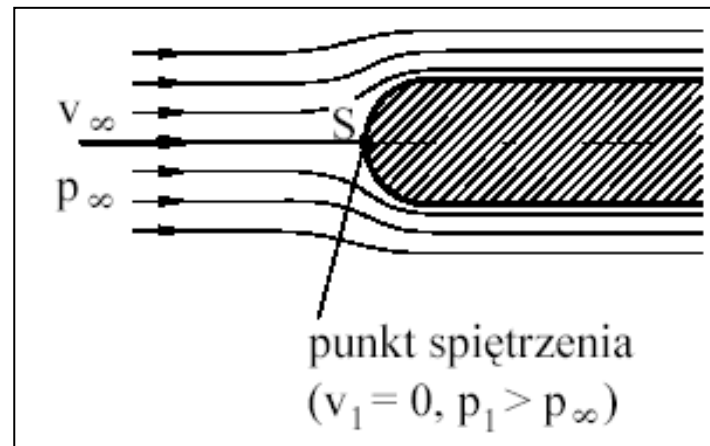
Gdy prędkość nie zależy od czasu linie prądu są gładkimi trajektoriami, po których poruszają się małe cząstki płynu.

Na przewężeniach, gdzie prędkość jest większa a ciśnienie mniejsze, linie prądu biegną bliżej siebie.

Jeśli prędkość płynu jest duża mogą pojawić się turbulencje. Linie prądu ulegają ciągłym zmianom, zakrzywiają się i tworzą wiry. Powoduje to hamowanie strumienia, a część energii płynu zamienia się w ciepło.

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Punkt spiętrzenia



W obszarze przepływu mogą znajdować się punkty, w których prędkość przepływu jest zerowa, nazywane punktami spiętrzenia.

$$p_\infty + \frac{\rho v_\infty^2}{2} = p_s \rightarrow \Delta p = p_s - p_\infty = \frac{\rho v_\infty^2}{2}$$

Jeżeli płyn poruszający się ruchem jednostajnym z prędkością v_∞ pod ciśnieniem p_∞ napotyka na przeszkodę w postaci ciała zanurzonego, to przed przeszkodą następuje spiętrzenie w punkcie **S** oraz opływ rozdzielonych strug dookoła tej przeszkody.

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Równanie Clapeyrona

Jest to równanie stanu gazu przedstawiające związek gęstości, ciśnienia i temperatury

$$\rho = \frac{p}{RT} \text{ gdzie } R = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$$

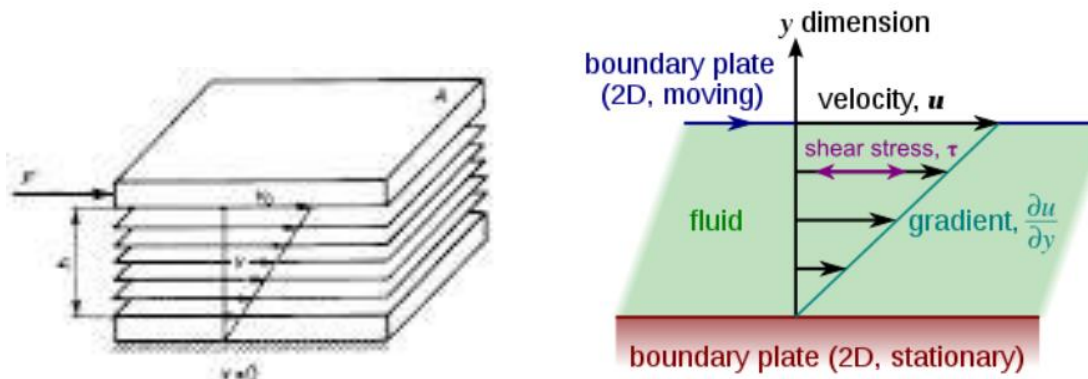
Jest to przydatny wzór do określania gęstości przy zadanym ciśnieniu p i temperaturze T .

Dla prędkości powietrza rozważanych w zagadnieniach opływu budynków przyjmujemy, że gęstość jest stała!

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Płyny rzeczywiste

Płyn rzeczywisty charakteryzuje się lepkością i ściśliwością. Podczas przepływu występują straty energii związane z tarciem wewnętrznym pomiędzy przemieszczającymi się warstwami.



Część molekuł może ulegać wymianie pomiędzy sąsiednimi elementami. Te molekuły mają prędkość – czyli przekazują pęd między warstwami.

Lepkość cieczy jest efektem wymiany pędu molekuł.

Zmiana pędu odniesiona do jednostki czasu daje wielkość hamującej siły stycznej na powierzchni styku elementów. Siła ta odniesiona do jednostki powierzchni stanowi naprężenie styczne.

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial n}$ gdzie τ – naprężenie styczne, $\frac{\partial v}{\partial n}$ – zmiana prędkości w kierunku normalnym

μ – lepkość dynamiczna

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – lepkość kinematyczna

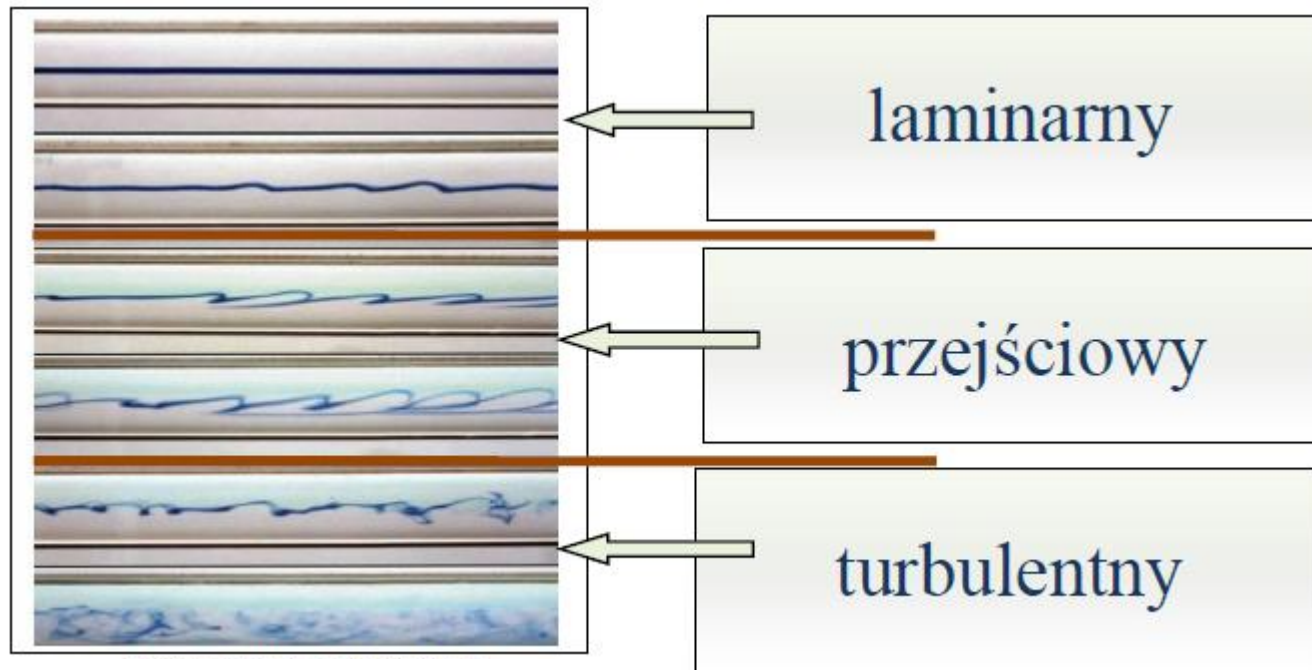
Konsekwencją lepkości płynu są straty energii w przepływie manifestujące się spadkiem ciśnienia.

Równania Naviera – Stokesa - są równaniami ruchu płynu rzeczywistego .
Wiążą one pole przyspieszeń z polem sił zewnętrznych, polem sił ciśnieniowych i siłami wynikającymi z lepkości. Dla stałej gęstości mają postać:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad } p + \mu \Delta \vec{v}$$

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

W zależności od tego czy molekuly wymieniają pęd tylko między sąsiednimi warstwami czy też w całej objętości płynu mówimy o **ruchu laminarnym lub turbulentnym**.



<https://www.azimuthproject.org/azimuth/show/Blog+-+eddy+who%3F>

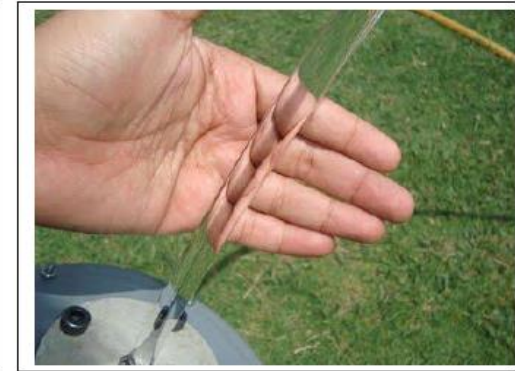
Ruch laminarny – powolny bez pulsacji prędkości. W ruchu tym wymiana masy pędu i energii zachodzi na drodze molekularnej pomiędzy sąsiednimi warstwami.



<http://www.geol.umd.edu/~jmerck/geo1342/lectures/04.html>



http://www.waterartsconsulting.com/waterfall_weirs



<http://my-woodcarving.blogspot.com/2011/06/updates-on-laminar-flow-nozzle.html>

Ruch turbulentny – szybki, dla którego zachodzą znaczące losowe zmiany prędkości, a między sąsiednimi warstwami zachodzi wymiana masy, pędu i energii na drodze elementów płynu.



<https://studiousguy.com/turbulent-flow-examples/>

PODSTAWOWE ZAGADNIENIA MECHANIKI PŁYNÓW

Liczba Reynoldsa

Do określenia kiedy ruch płynu jest laminarny, a kiedy może pojawić się ruch turbulentny służy tak zwana liczba Reynoldsa:

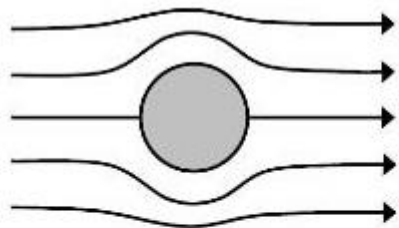
$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$$

gdzie v - oznacza prędkość płynu, l - wymiar charakterystyczny (w przypadku budynku jest to wysokość), ν - lepkość kinematyczna płynu.

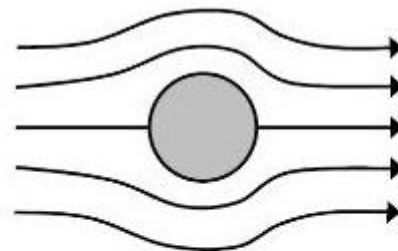
Dla każdego rodzaju przepływu istnieje krytyczna liczba Reynoldsa, poniżej której przepływ turbulentny nie będzie obserwowany.

Liczba Reynoldsa należy do tak zwanych liczb podobieństwa przepływów.

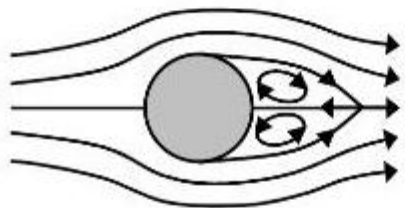
Optyw walca dla różnych liczb Reynoldsa



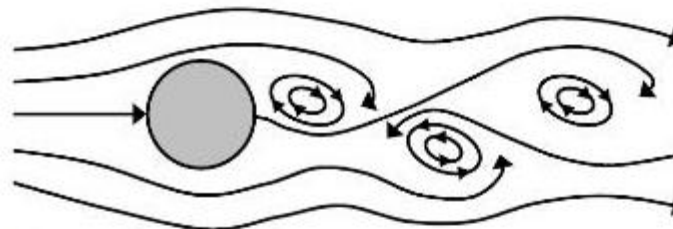
Inviscid flow: $Re = \infty$



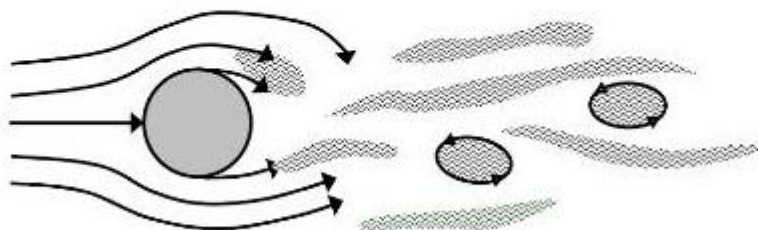
$Re \approx 0.01$



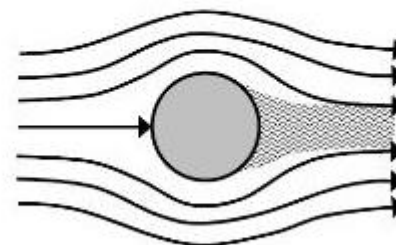
$Re \approx 20$



$Re \approx 100$



$Re \approx 10\,000$



$Re \approx 10\,000\,000$

Podobieństwo przepływów

- W celu porównywania dynamiki różnych (geometrycznie podobnych) przepływów (np. porównanie opływu budynku z opływem jego modelu w tunelu aerodynamicznym) potrzebne jest wprowadzenie bezwymiarowej formy równań rządzących przepływem czyli równania ciągłości i równań Naviera - Stokesa (oraz warunków brzegowych i początkowych)
- Forma równania jest niezależna od wyboru jednostek fizycznych użytych do ilościowego opisu występujących w nim pól fizycznych.
- Przy okazji okaże się, że każdy przepływ jest scharakteryzowany szeregiem bezwymiarowych wielkości zwanych liczbami podobieństwa

Pierwszy krok w kierunku uzyskania bezwymiarowego opisu ruchu płynu polega na wprowadzeniu skal charakterystycznych dla czasu, wymiarów liniowych i wszystkich parametrów ruchu.

$$t = T \cdot t', \quad x_k = Lx'_k, \quad p = p_0 p', \quad v_k = Uv'_k$$

T – skala czasu, **L**- skala długości, **p₀** – skala ciśnienia, **U** – skala prędkości.

Wstawiając podane zależności do równania Naviera-Stokesa otrzymujemy bezwymiarowe równanie, w którym pojawiają się współczynniki będące bezwymiarowymi kombinacjami przyjętych skal.

$$\frac{L}{UT} \frac{\partial v'_j}{\partial t} + v'_k \frac{\partial v'_j}{\partial x'_k} = \left(\frac{gL}{U^2} \right) F'_j - \left(\frac{p_0}{\rho U^2} \right) \frac{\partial p'}{\partial x'_j} + \left(\frac{\mu}{\rho UL} \right) \Delta' v'_j$$

W otrzymanym w ten sposób bezwymiarowym równaniu Naviera-Stokesa pojawiły się współczynniki będące bezwymiarowymi kombinacjami przyjętych skal, a mianowicie liczba Strouhala - **St** , liczba Froude'a – **Fr**, liczba Eulera – **Eu** i liczba Reynoldsa – **Re**

$$\frac{1}{St} \frac{\partial v'_j}{\partial t} + v'_k \frac{\partial v'_j}{\partial x'_k} = \frac{1}{Fr} F'_j - \frac{1}{Eu} \frac{\partial p'}{\partial x'_j} + \frac{1}{Re} \Delta' v'_j$$

W sensie fizycznym: liczby podobieństwa mówią nam jak istotne (jak wielkie w porównaniu z siłami bezwładności konwekcyjnej płynu) dla dynamiki przepływu są efekty związane z:

- niestacjonarnością ruchu (liczba Strouhala)
- siłami ciśnieniowymi (liczba Eulera)
- siłami wynikającymi z lepkości (liczba Reynoldsa) oraz
- zewnętrznym polem sił objętościowych (liczba Froude'a).

WARUNKI DYNAMICZNEGO PODOBIEŃSTWA PRZEPIYWÓW

- Obszary ruchu muszą być podobne geometrycznie
- Bezwymiarowe warunki brzegowe i początkowe muszą być identyczne
- Liczby podobieństwa są takie same (np. Re i St)

Podobieństwo przepływów stosujemy gdy przepływ rzeczywisty chcemy odtworzyć w tunelu aerodynamicznym. Nie robimy pomiarów ilościowych i jakościowych w terenie a w warunkach podobnych w laboratorium.

