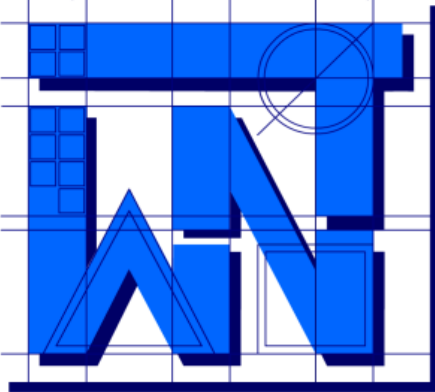


Wydział Nauk Technicznych



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN
The Faculty of Technical Sciences
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



Obliczeniowa Dynamika Płynów

Computational Fluid Dynamics – CFD

Strategie modelowania numerycznego

wersja: 13 lutego 2024

Wojciech Sobieski

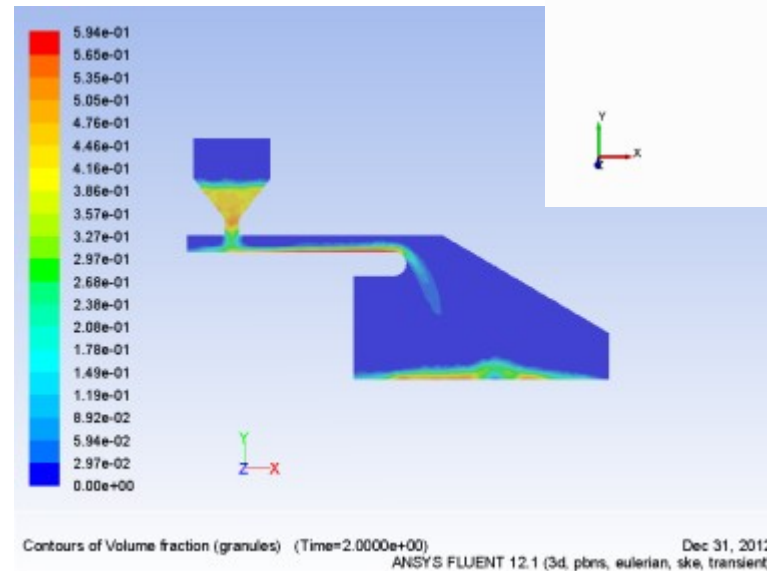
Olsztyn, 2003-2024

Model bazowy

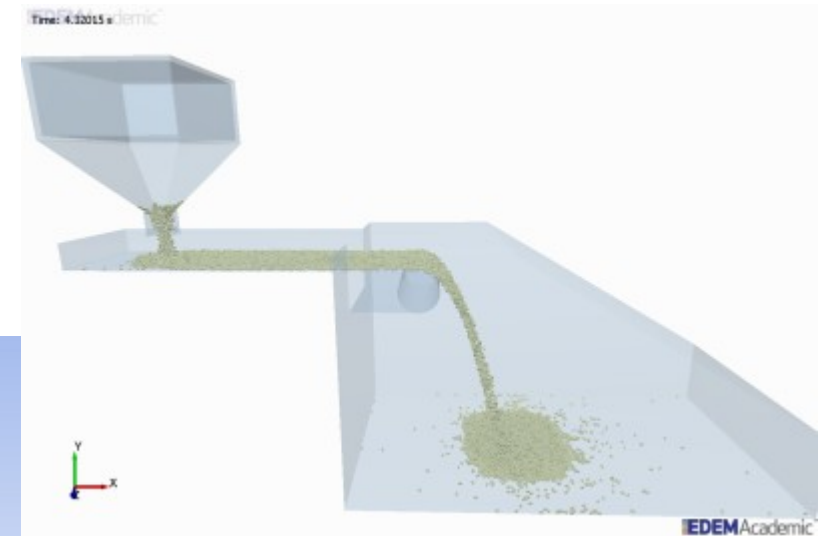
Model bazowy – model, który zgadza się z eksperymentem na założonym poziomie (jakościowym i ilościowym) i który można uznać za wirtualny odpowiednik układu rzeczywistego.



eksperyment



FVM



DEM

Weryfikacja i walidacja

Weryfikacja (aspekt techniczny) – dostarczenie dowodów, że dany model jest wykonany prawidłowo i spełnia zdefiniowane wymagania (czy budujemy produkt dobrze).

Przykład: tworzymy we Fluencie UDF-a z domknięciem modelu, który dostępny jest również z interfejsu – jeżeli oba sposoby implementacji domknięcia dają ten sam wynik, to znaczy, że technicznie UDF został wykonany poprawnie (model został zweryfikowany).

Walidacja (aspekt merytoryczny) – dostarczenie dowodów, że dany model może odzwierciedlać układ rzeczywisty (czy budujemy dobry produkt).

Przykład: wyniki symulacji (z UDF-a lub z interfejsu) porównujemy z eksperymentem – jeżeli zgodność wyników jest zadowalająca, to model uznajemy za poprawny (model został zwalidowany).

Weryfikacja i walidacja

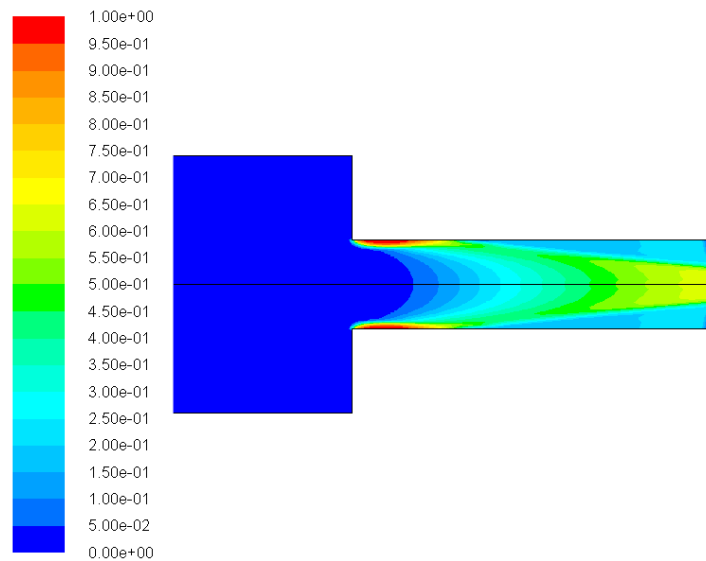
Tab. 1. Walidacja i weryfikacja algorytmicznego modelu symulacyjnego według wybranych autorów

Źródło	Walidacja	Weryfikacja
[Schlesinger i in. 1979]	Sprawdzanie, czy model komputerowy ma - w swojej dziedzinie zastosowań - wystarczający poziom trafności.	Sprawdzanie, czy model komputerowy jest wystarczająco trafną reprezentacją modelu konceptualnego.
[Balci 1997]	Stwierdzenie, że działanie modelu, w założonej dziedzinie zastosowań, jest zasadne; zgodne z celami modelowania.	Stwierdzenie wystarczającej trafności transformacji jednej formy modelu w drugą
[Tucker i in. 1995]	Proces rozstrzygnięcia o stopniu, w jakim model jest wiernym odwzorowaniem rzeczywistości z perspektywy jego zamierzanych zastosowań.	Proces rozstrzygnięcia, czy implementacja modelu jest zgodna z opisem i specyfikacją jego twórcy.

Opracowanie własne

Weryfikacja i walidacja

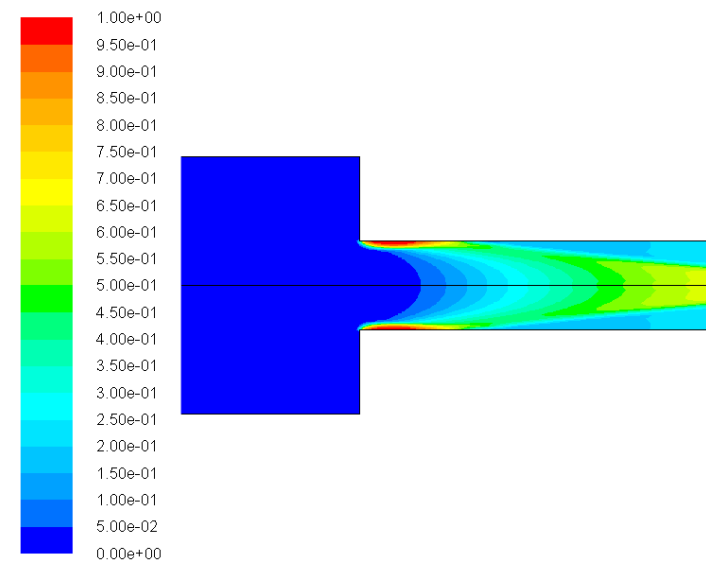
Wynik z UDF-u



Contours of Volume fraction (vapour)

Oct 25, 2016
ANSYS Fluent 14.5 (axi, dp, pbns, mixture, rke)

Wynik z interfejsu



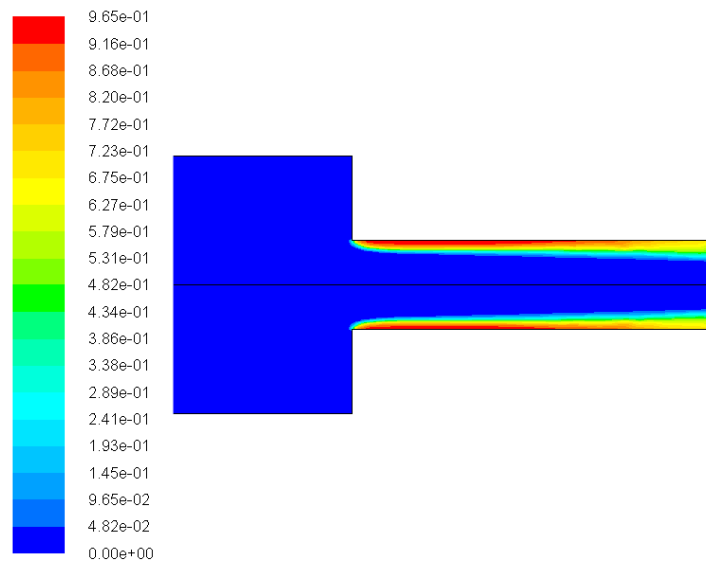
Contours of Volume fraction (vapour)

Oct 25, 2016
ANSYS Fluent 14.5 (axi, dp, pbns, mixture, rke)

Weryfikacja
implementacji modelu
Singhala w pakiecie
ANSYS Fluent

Weryfikacja i walidacja

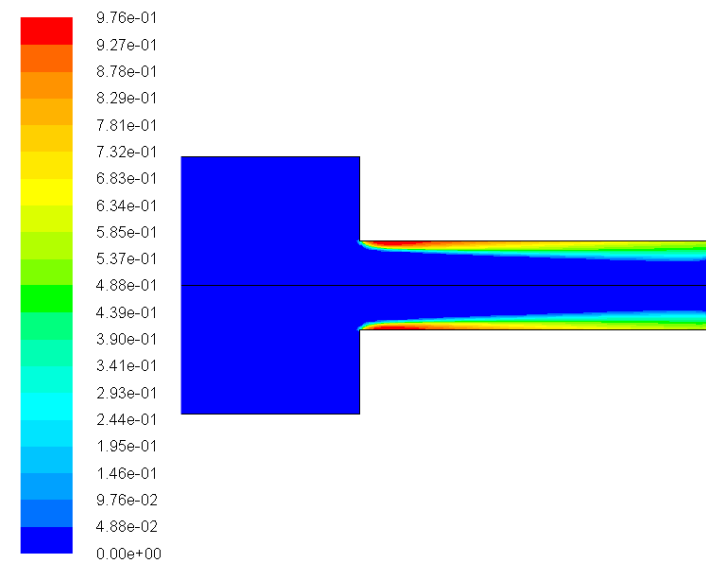
Wynik z UDF-u



Contours of Volume fraction (vapour)

Dec 20, 2016
ANSYS Fluent 14.5 (axi, dp, pbns, mixture, rke)

Wynik z interfejsu



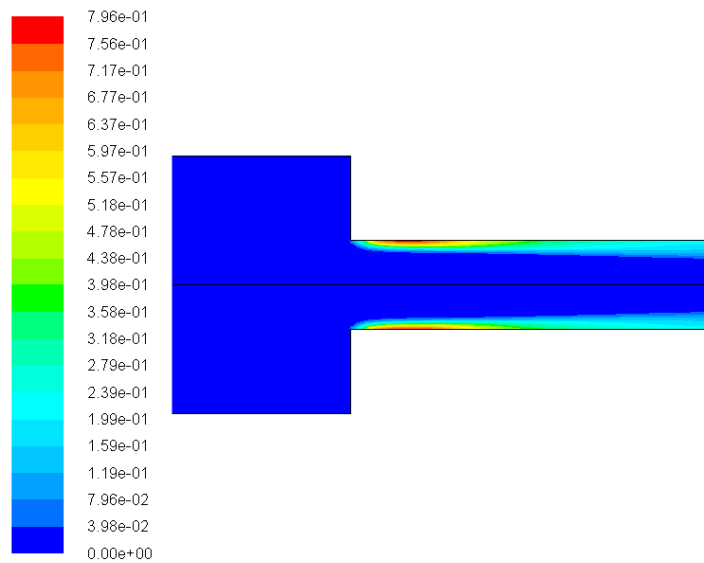
Contours of Volume fraction (vapour)

Oct 24, 2016
ANSYS Fluent 14.5 (axi, dp, pbns, mixture, rke)

Weryfikacja
implementacji modelu
Schnera-Zauera w
pakiecie ANSYS Fluent

Weryfikacja i walidacja

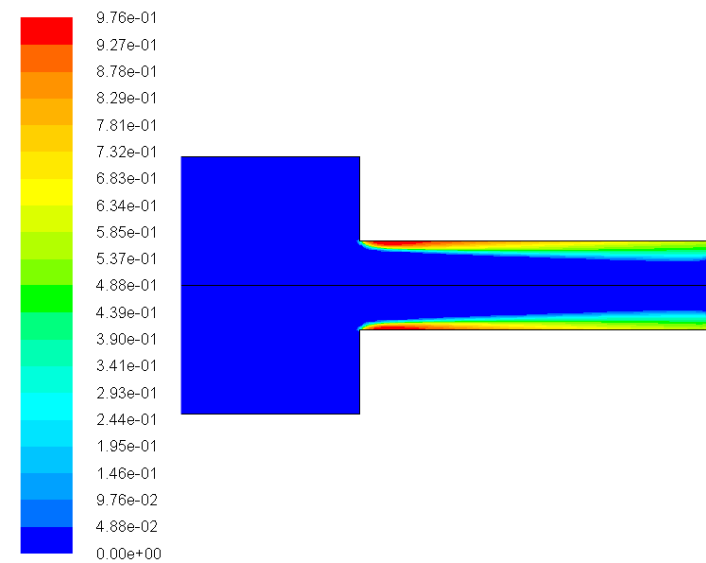
Wynik z UDF-u



Contours of Volume fraction (vapour)

Dec 20, 2016
ANSYS Fluent 14.5 (axi, dp, pbns, mixture, rke)

Wynik z interfejsu

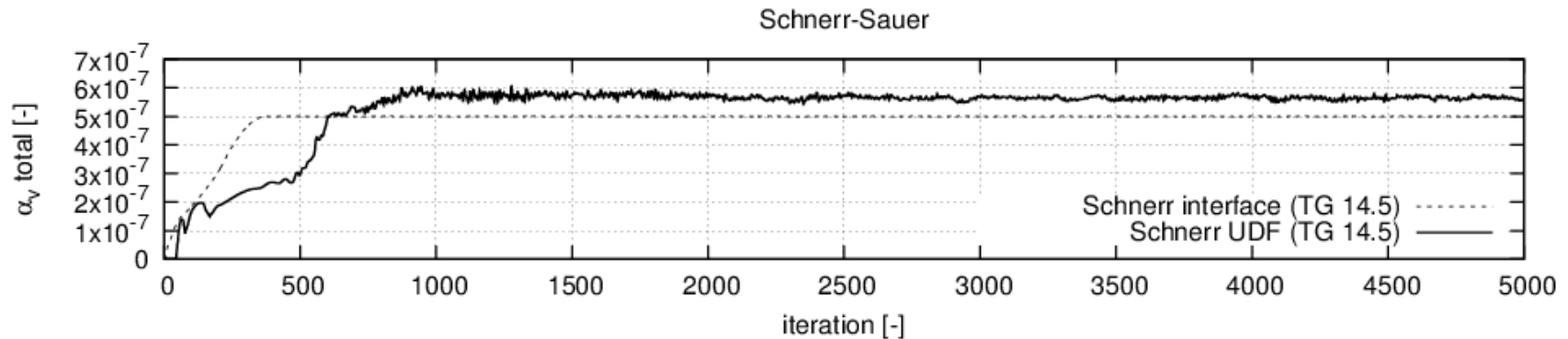
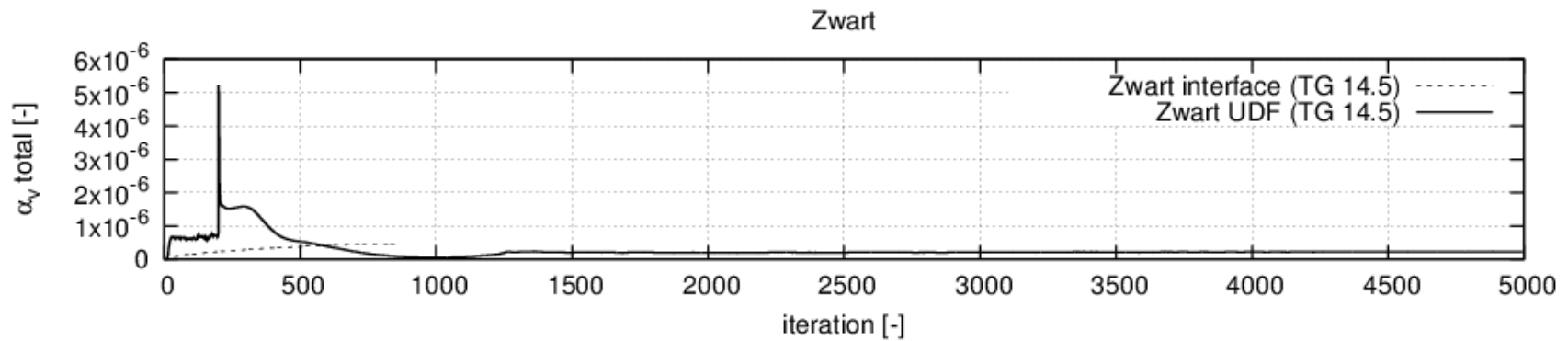
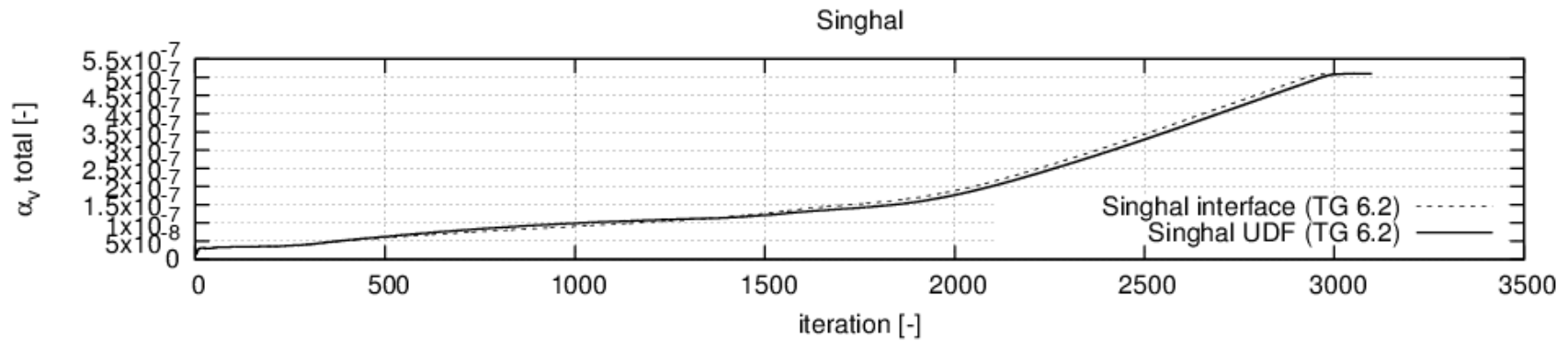


Contours of Volume fraction (vapour)

Feb 03, 2017
ANSYS Fluent 14.5 (axi, dp, pbns, mixture, rke)

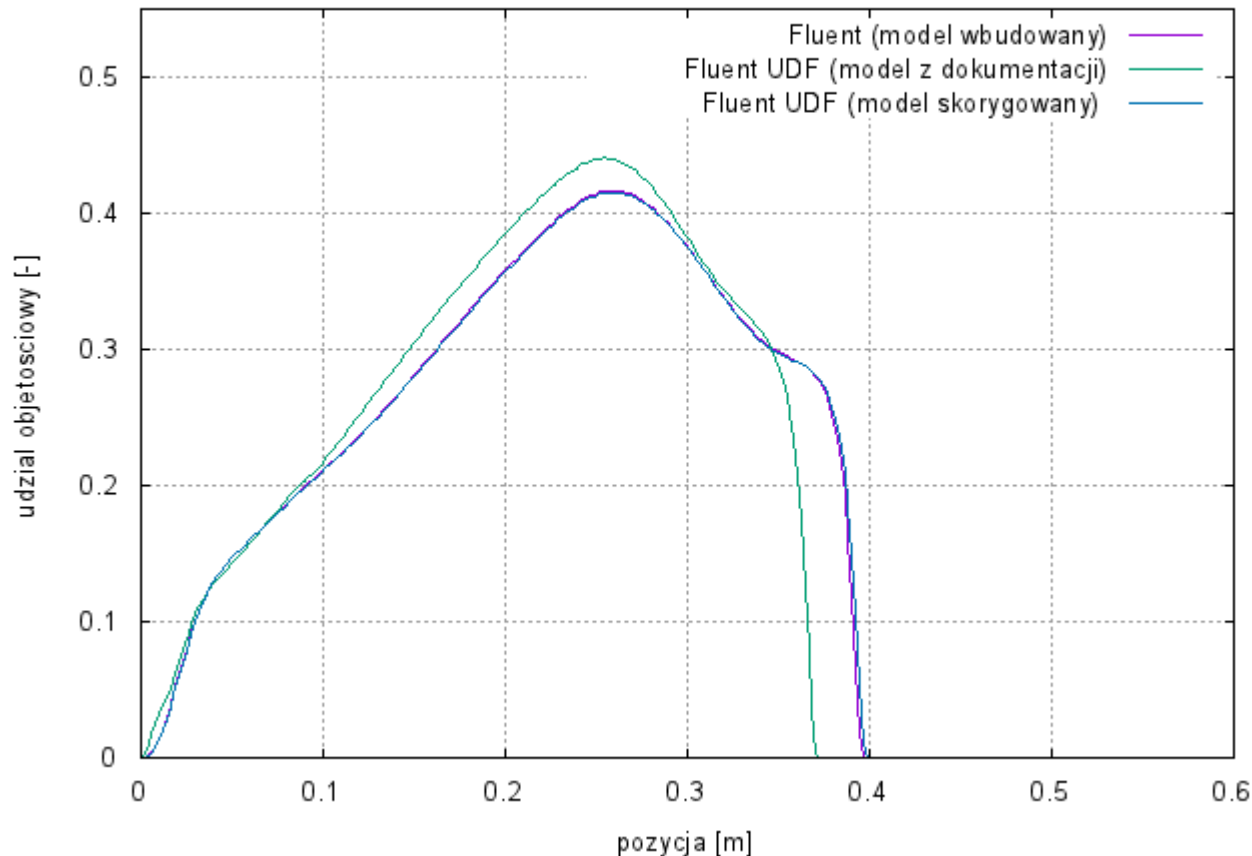
Weryfikacja
implementacji modelu
Zwarta w pakiecie
ANSYS Fluent

Weryfikacja i walidacja



Weryfikacja i walidacja

Rozkład udziału objętościowego fazy granularnej w osi suszarki



Przykład wykrycia błędu w dokumentacji Fluenta – jest:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} \left(1 + 0.15 (Re_s)^{0.687} \right)$$

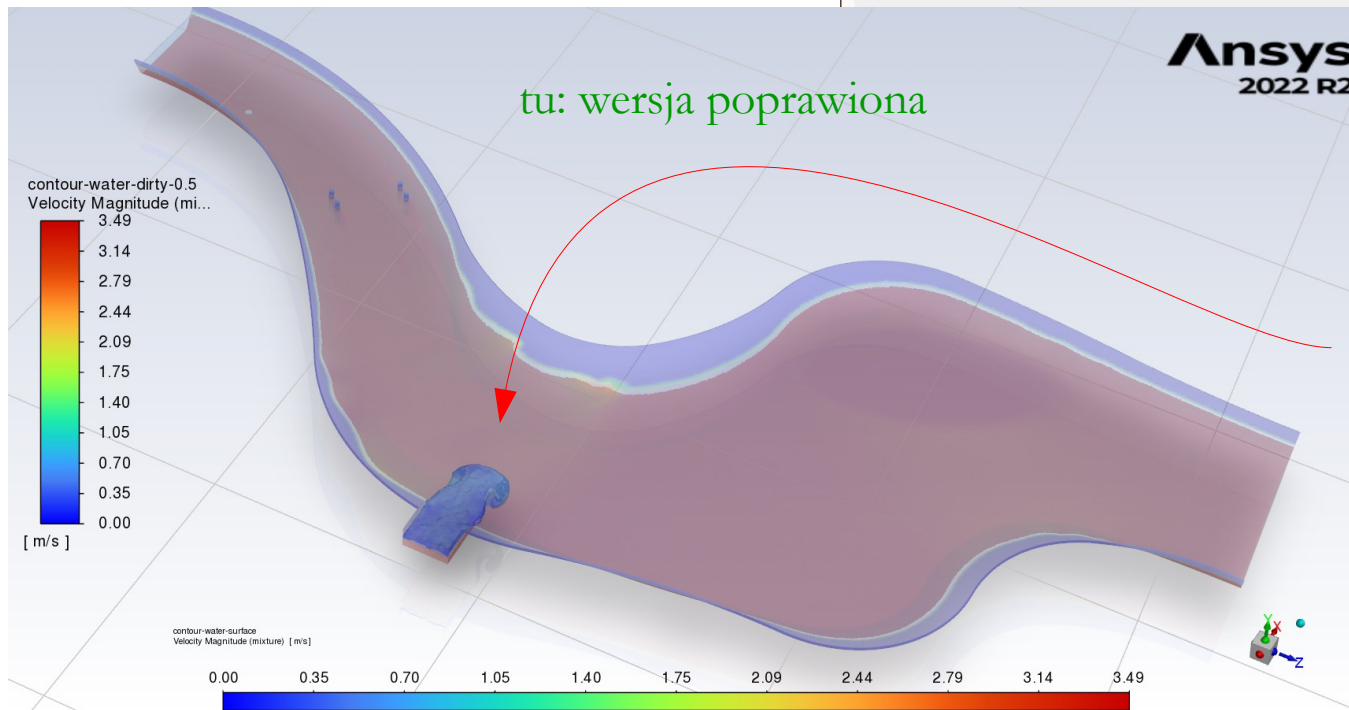
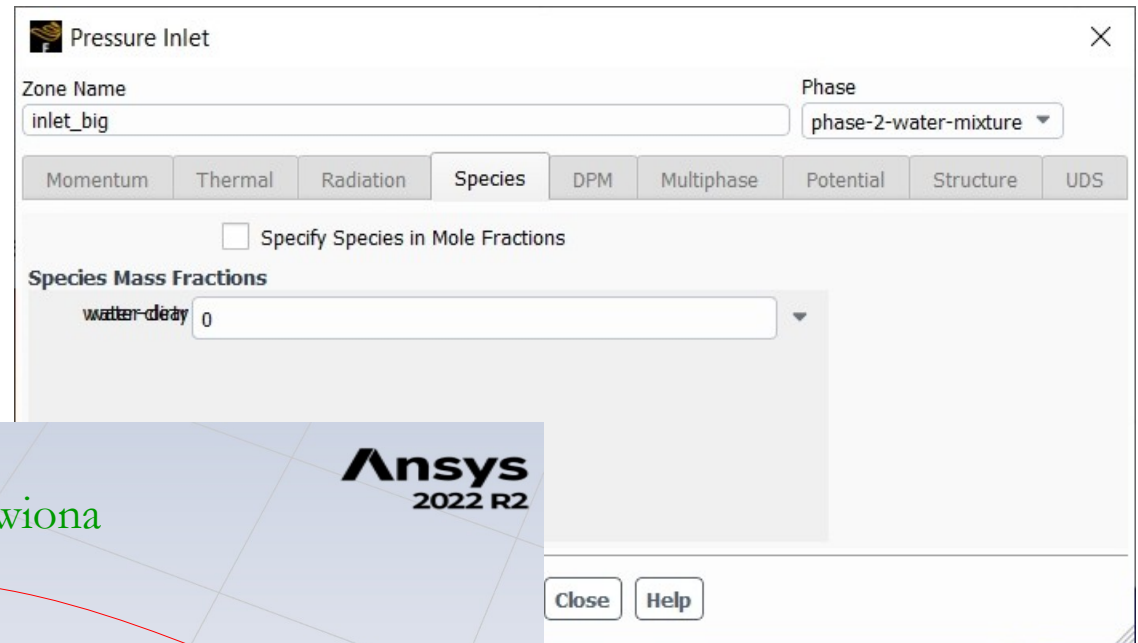
a powinno być:

$$C_D = \frac{24}{Re_s} \left(1 + 0.15 (Re_s)^{0.687} \right)$$

Weryfikacja i walidacja

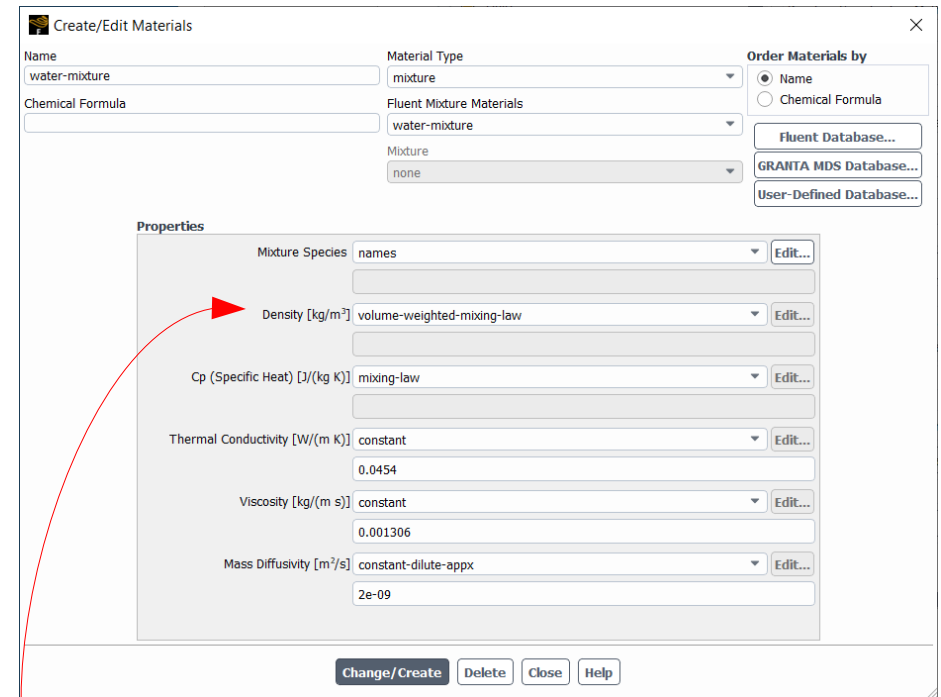
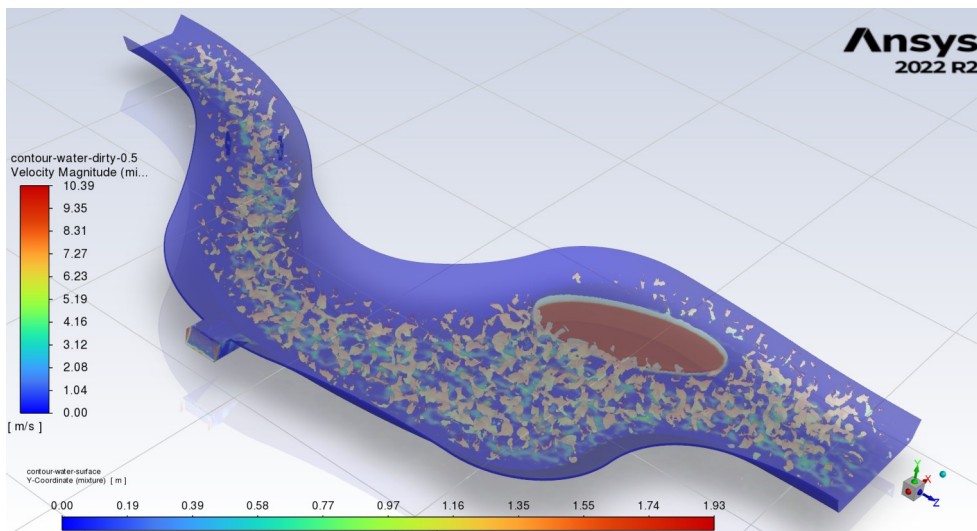
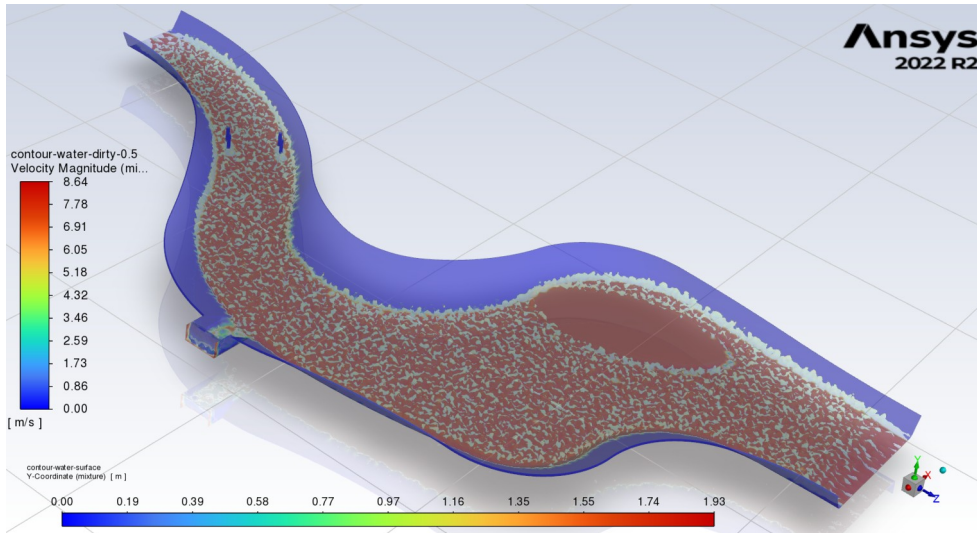
Species Mass Fractions

~~water-dirty~~ 0



Przykład błędu programu ANSYS Fluent – mimo poprawnej (jak się wydawało konfiguracji) w symulacji nie pojawiał się drugi składnik mieszaniny homogenicznej.

Weryfikacja i walidacja



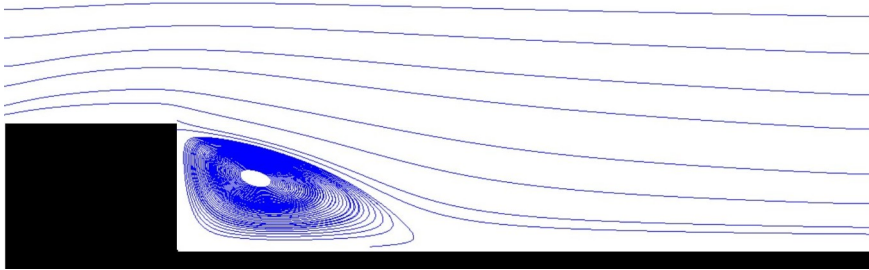
tu: wersja poprawiona

Density [kg/m³] volume-weighted-mixing-law

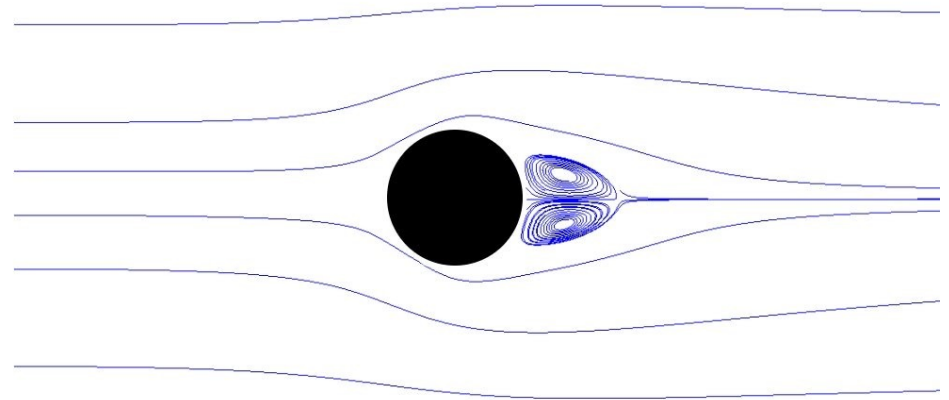
Przykład niedopracowanego interfejsu programu ANSYS Fluent – mimo zmiany składników mieszaniny na wodę czystą i wodę brudną, gęstość mieszaniny pozostała taka, jak dla materiału domyślnego (powietrza).

Weryfikacja i walidacja

W literaturze (obecnie również w Internecie) spotkać można pewną grupę eksperymentów wzorcowych, służących do weryfikacji i walidacji nowych kodów obliczeniowych, modeli matematycznych bądź też algorytmów.



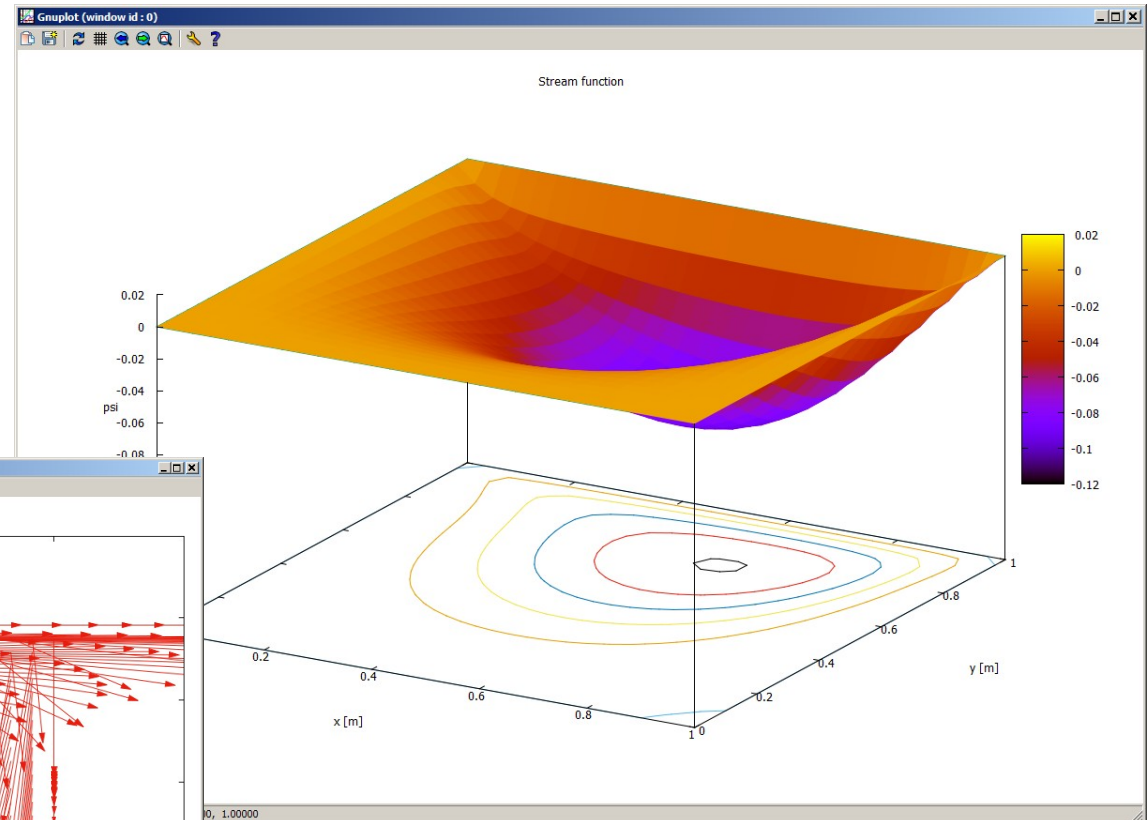
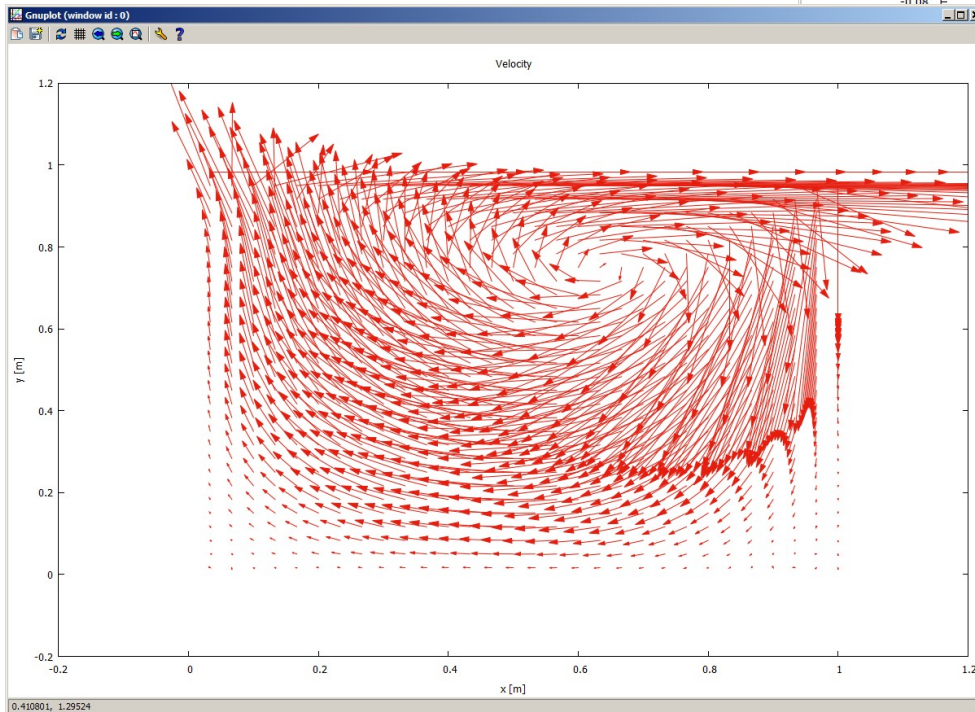
Kanał z uskokiem.



Opływ cylindra.

Weryfikacja i walidacja

Wnęka (prędkość zadaje się tylko stycznie na górnym brzegu obszaru).



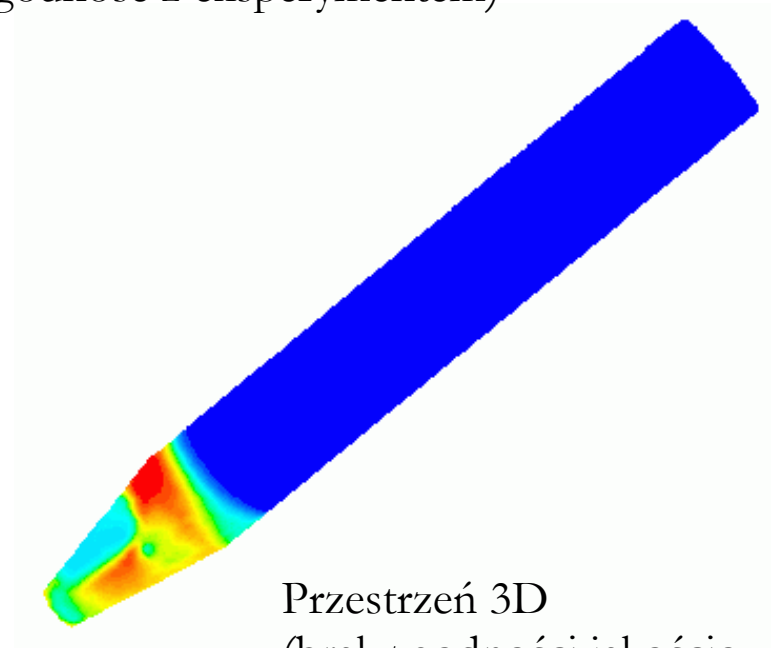
przykład testu programu MAC
(znalezionego kiedyś w Internecie i
przerobionego na własne potrzeby)

Zgodność jakościowa i ilościowa

Zgodność jakościowa – zgodność, w której wyniki symulacji mają taki sam charakter co wyniki eksperymentu, ale wartości poszczególnych parametrów istotnie się różnią.



Przestrzeń 2D – osiowo-symetryczna
(jakościowa zgodność z eksperymentem)

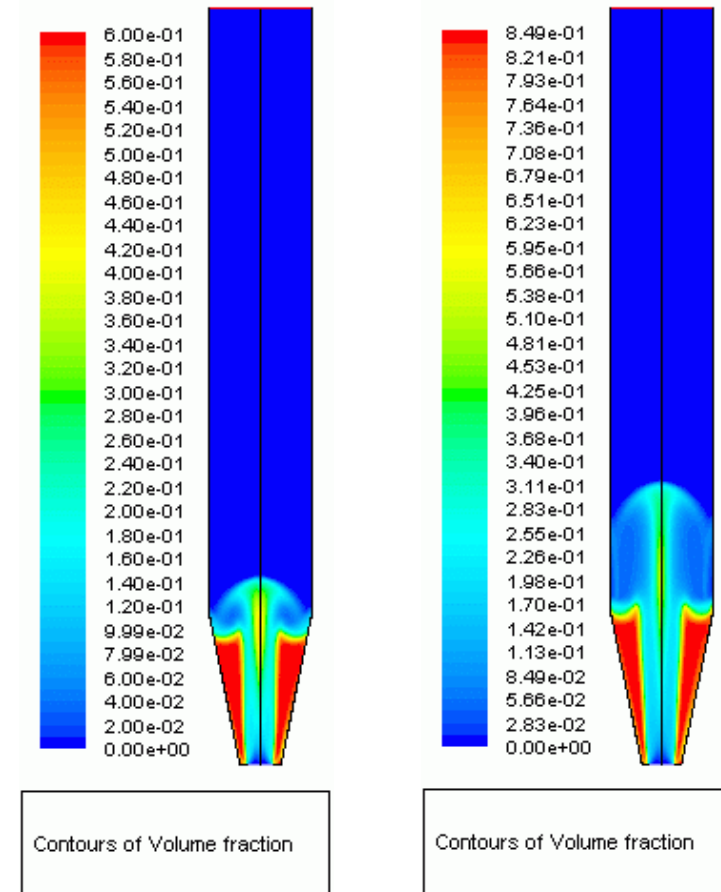


Przestrzeń 3D
(brak zgodności jakościowej)

Zgodność jakościowa i ilościowa

Zgodność ilościowa – zgodność, w której wyniki symulacji mają taki sam charakter co wyniki eksperymentu, a do tego wartości poszczególnych parametrów zgadzają się na poziomie dopuszczalnego błędu.

Oba modele są poprawne pod względem jakościowym, jednak tylko w drugim przypadku (po prawej), fontanna ma kształt i wysokość zgodną z pomiarami eksperymentalnymi.

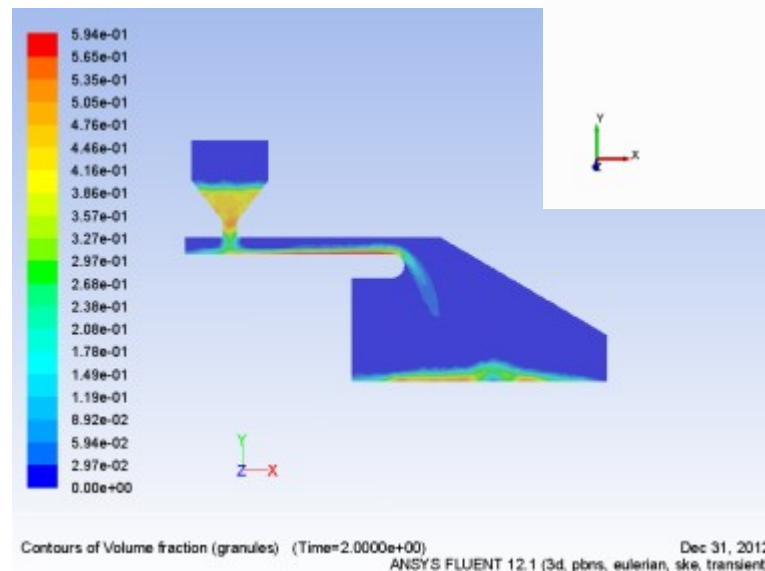


Zgodność jakościowa i ilościowa

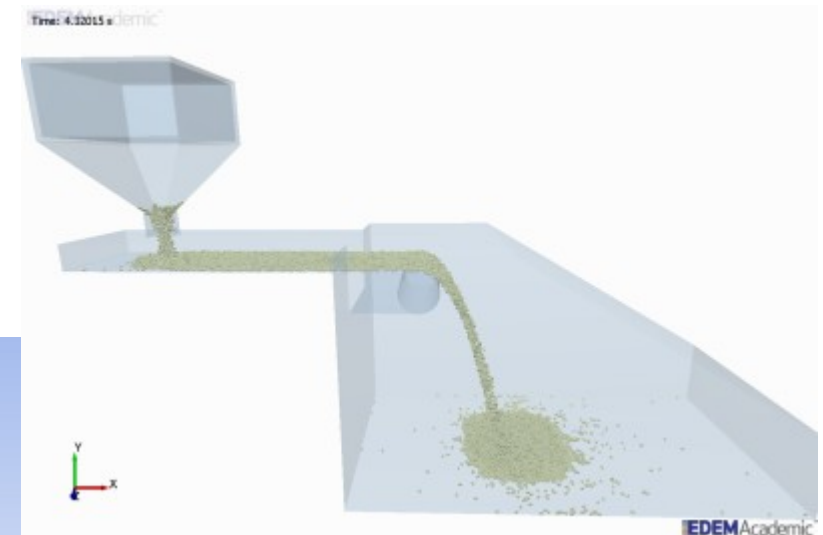
Jakościowo zgodny jest jedynie model wykonany Metodą Elementów Dyskretnych. W symulacji wykonanej za pomocą Wielofazowego Modelu Eulera, na płaszczyźnie dolnej nie tworzy się charakterystyczne wzniesienie (należy poprawić domknięcia odpowiedzialne za tarcie).



eksperyment



FVM



DEM

Główne strategie modelowania

Główne strategie modelowania:

- strategia modelu bazowego
(podstawowa strategia podejścia naukowego),
- strategia odchyłeń od modelu bazowego
(najbardziej praktyczna strategia podejścia inżynierskiego),
- strategia modelu jakościowego
(szacunkowa strategia naukowa lub inżynierska).

Strategia modelu bazowego

Strategia modelu bazowego – metodyka modelowania oparta na eksperymencie, w której celem jest uzyskanie modelu bazowego.

Cel: uzyskanie dowodu na poprawność modeli teoretycznych.

Cechy:

- konieczność istnienia eksperymentu,
- poziom doskonałości modelu zależny od rodzaju i precyzji pomiarów (wykonanie nowych, dokładniejszych pomiarów może spowodować, że model pierwotnie uznany za bazowy będzie trzeba poprawić lub nawet odrzucić).

Strategia modelu bazowego

Podstawowe relacje między eksperymentem a modelem:

- istnieje eksperyment i tworzy się do niego model



- istnieje model i tworzy się do niego eksperyment



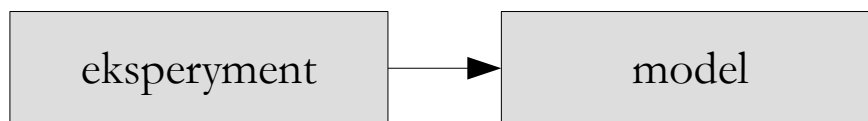
- istnieje i eksperyment i model, a tworzy się połączenie między nimi



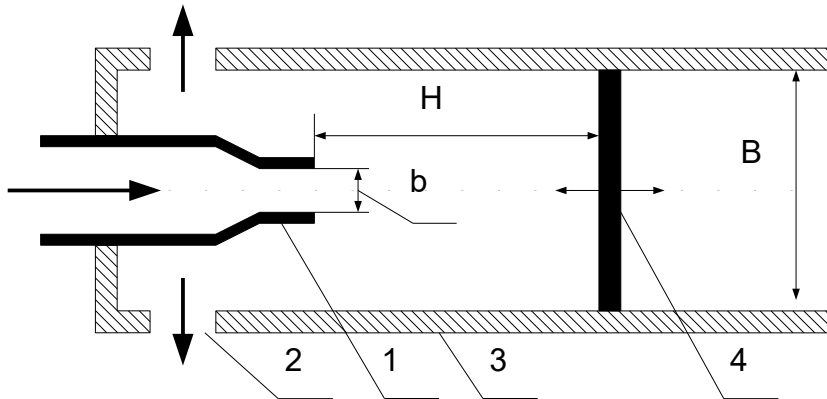
Strategia modelu bazowego

Wariant 1 strategii (izolacja) – model tworzy się w oparciu o ściśle określony zbiór danych doświadczalnych: eksperyment nie może być w żaden sposób powtórzony ani uzupełniony. Rozróżnia się dwa przypadki:

- tworzenie modelu na podstawie eksperymentu opisanego w literaturze (nie ma kontaktu z autorami); występuje tu duże ryzyko braku jakichś danych (co może się ujawnić już po rozpoczęciu prac),
- tworzenie modelu na podstawie własnego eksperymentu, ale takiego którego nie można powtórzyć (np. z przyczyn ekonomicznych) ani uzupełnić dodatkowymi danymi (np. nie ma już dostępu do obiektu, odpowiedniej aparatury, próbek materiału itp.).

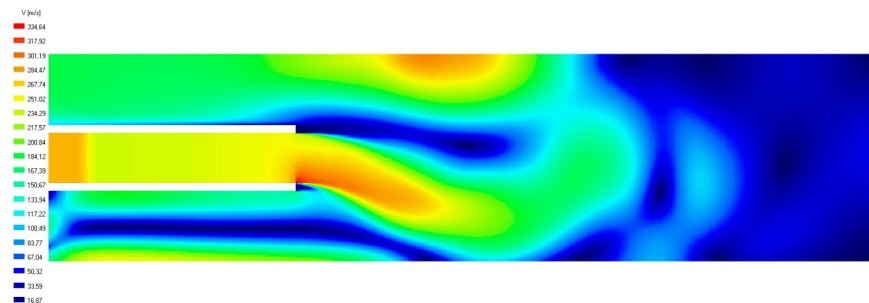
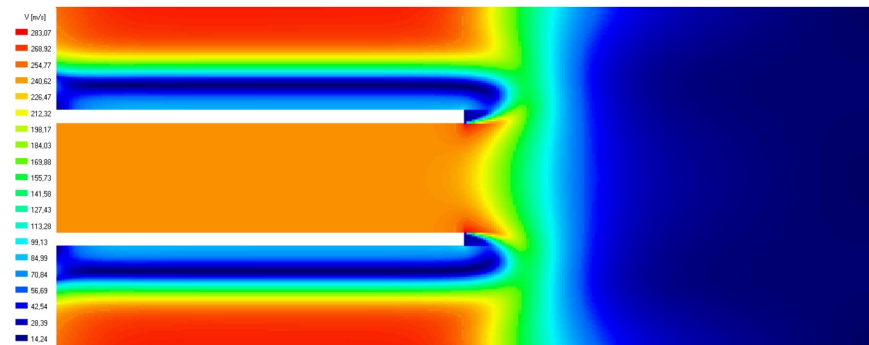
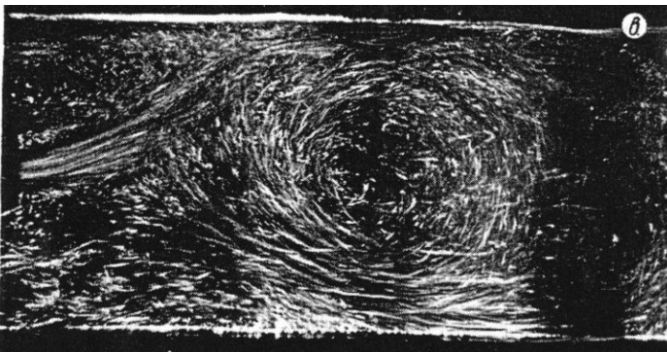
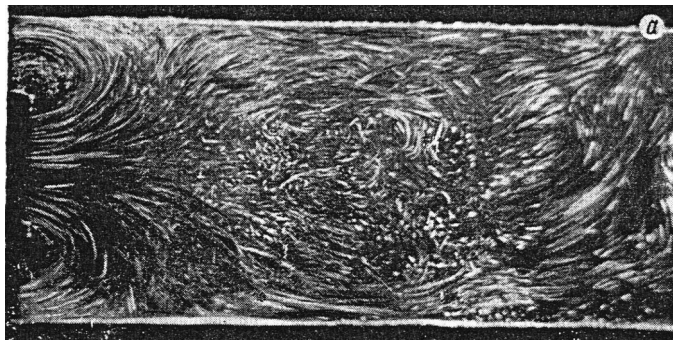


Strategia modelu bazowego

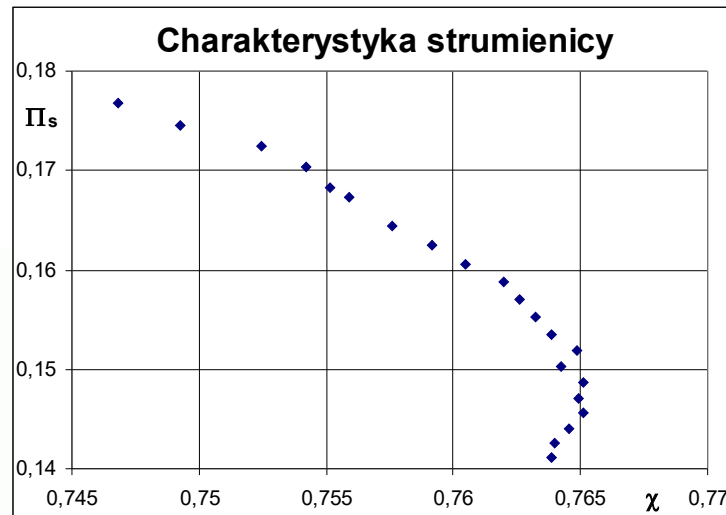


Przykład modelowania zjawiska bifurkacji w kanale płaskym, realizowanego na podstawie eksperymentów opisanych w literaturze.

Eksperyment został opisany jakościowo – nie było możliwości walidacji ilościowej modelu.

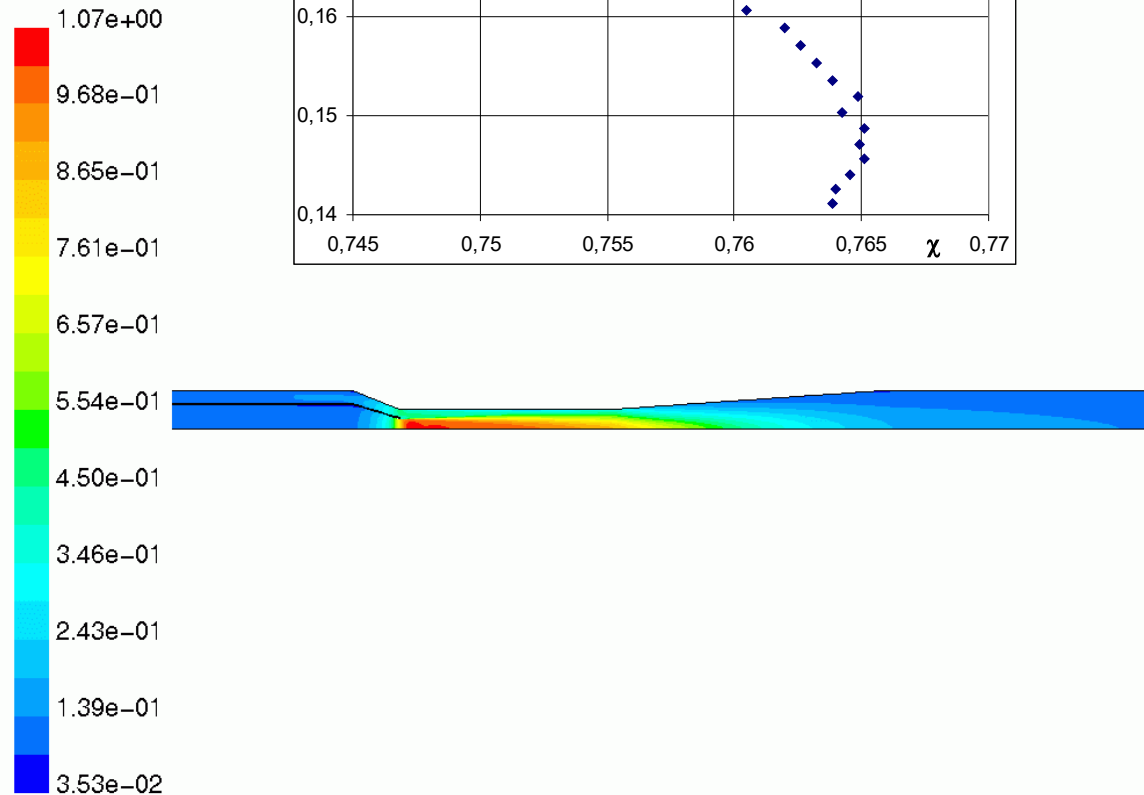


Strategia modelu bazowego



Przykład modelowania strumienicy powietrzno-powietrznej, realizowanego na podstawie eksperymentów opisanych w literaturze.

W dość późnej fazie przygotowań okazało się, że w artykule brak jest jednego wymiaru geometrycznego – wymiar ten oszacowano na podstawie zamieszczonych rysunków.



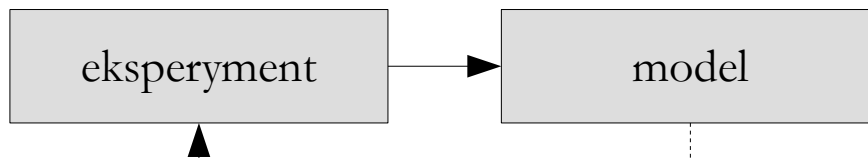
Contours of Mach Number

FLUENT 5.5 (axi, segregated, ke)

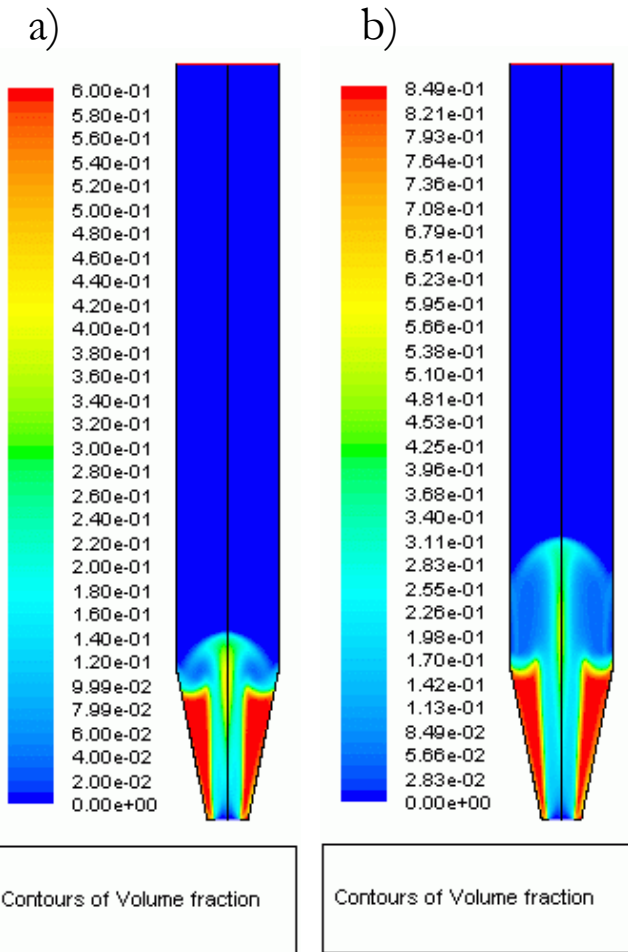
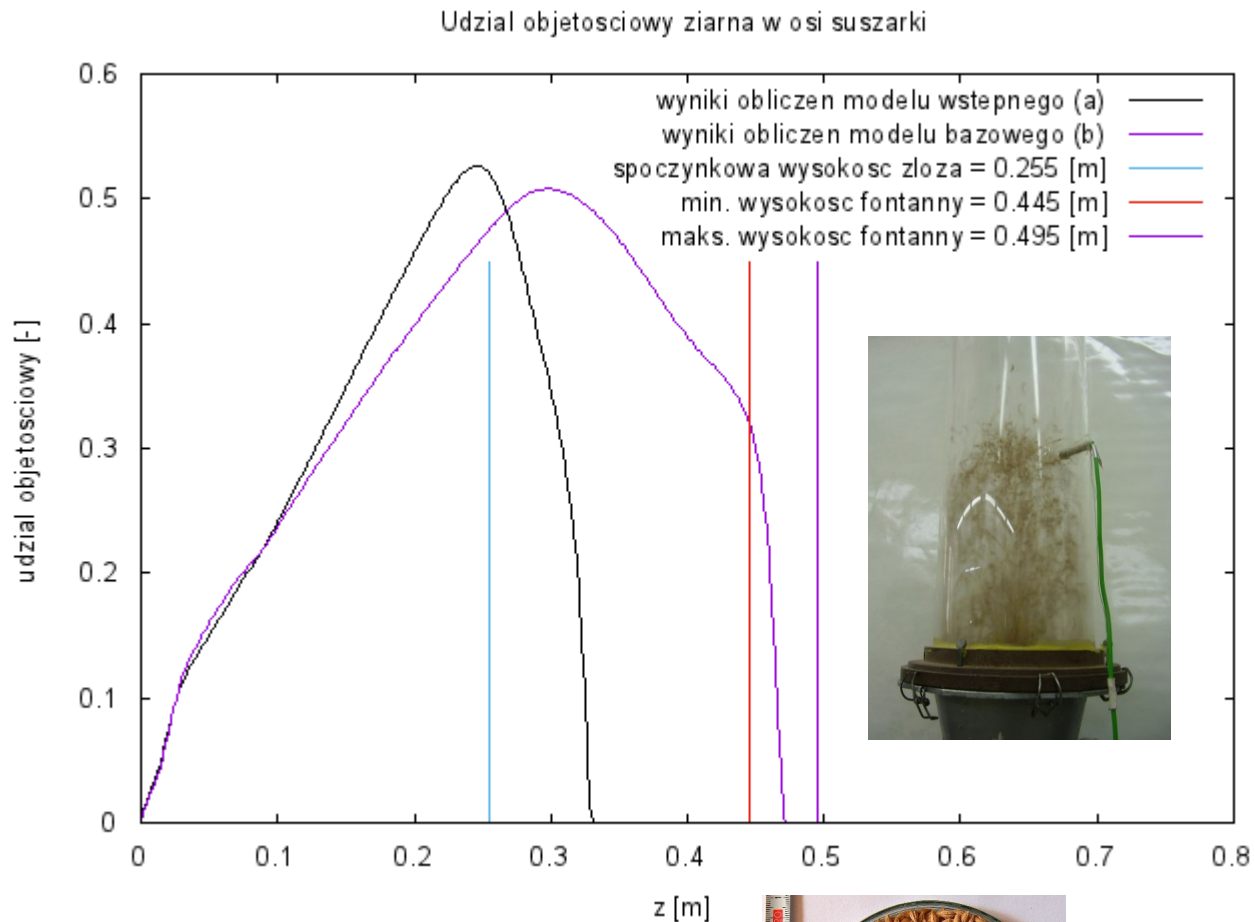
Strategia modelu bazowego

Wariant 2 strategii (izolacja częściowa) – model tworzy się w oparciu o ściśle określony zbiór danych doświadczalnych: eksperyment nie może być w żaden sposób powtórzony ale może być uzupełniony o nowe dane. Rozróżnia się dwa przypadki:

- tworzenie modelu na podstawie eksperymentu opisanego w literaturze – uzupełnienie danych uzyskuje się przez kontakt z autorami,
- tworzenie modelu na podstawie własnego eksperymentu, ale takiego którego nie można powtórzyć (np. z przyczyn ekonomicznych) – uzupełnienie danych uzyskuje się poprzez odszukanie notatek, pomiar geometrii (stanowisko nadal jest dostępne), pomiar cech (dostępny jest ten sam materiał), sprawdzenie dokładności użytych przyrządów itp.



Strategia modelu bazowego



Przykład modelowania dynamiki złoza fluidalnego:
 a) model wstępny
 b) model bazowy

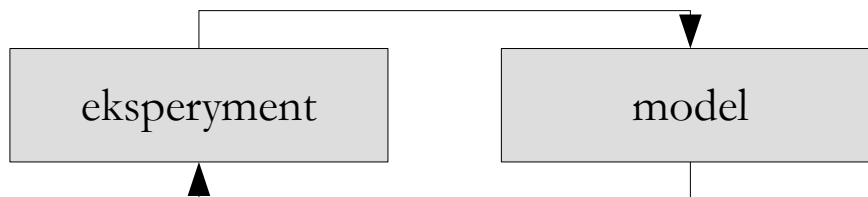
Po etapie wstępnym:

- skorygowano prędkość wlotową
- zmierzono rozmiary ziaren
- zmierzono porowatość złoza

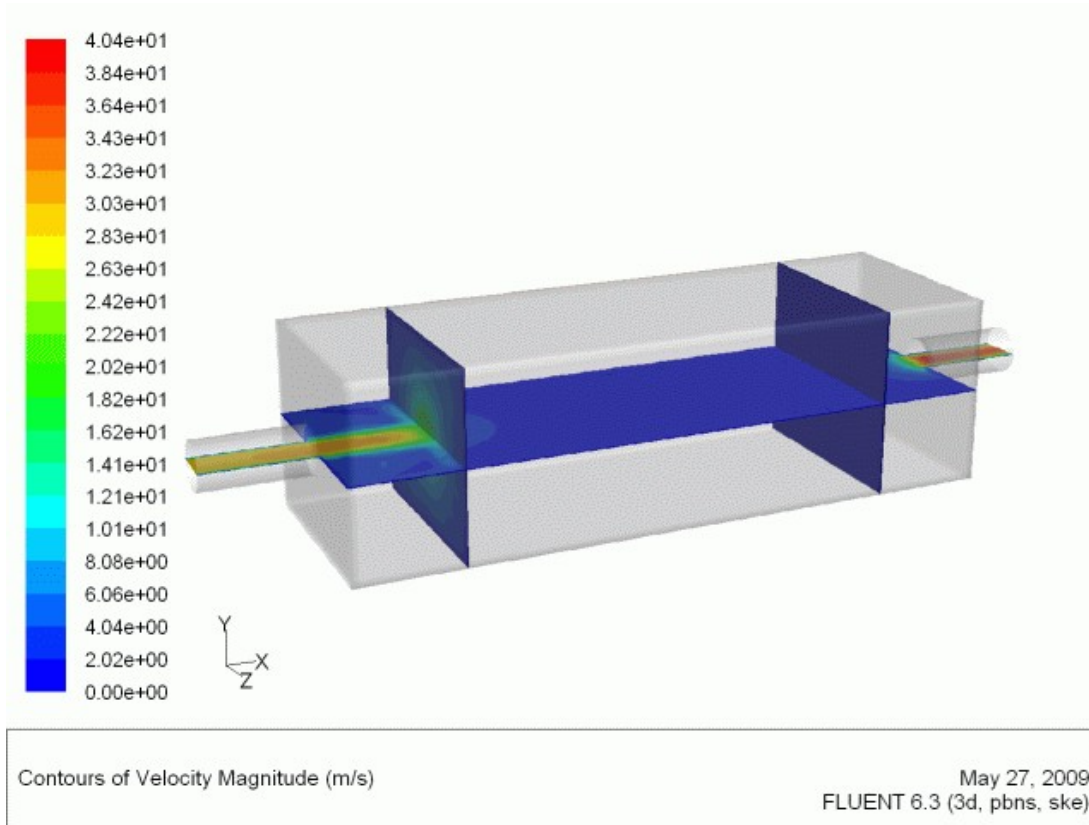
Strategia modelu bazowego

Wariant 3 strategii (z pętlą) – model tworzy się w oparciu o eksperyment, który można powtórzyć w wersji pierwotnej lub zmodyfikowanej. Rozróżnia się dwa przypadki:

- pierwszy eksperyment nie był planowany pod kątem wykorzystania go do opracowania modelu numerycznego – w takich przypadkach często nie zbiera się wszystkich danych niezbędnych do budowy lub walidacji modelu numerycznego,
- pierwszy eksperyment był od razu planowany jako odniesienie do modelu symulacyjnego.

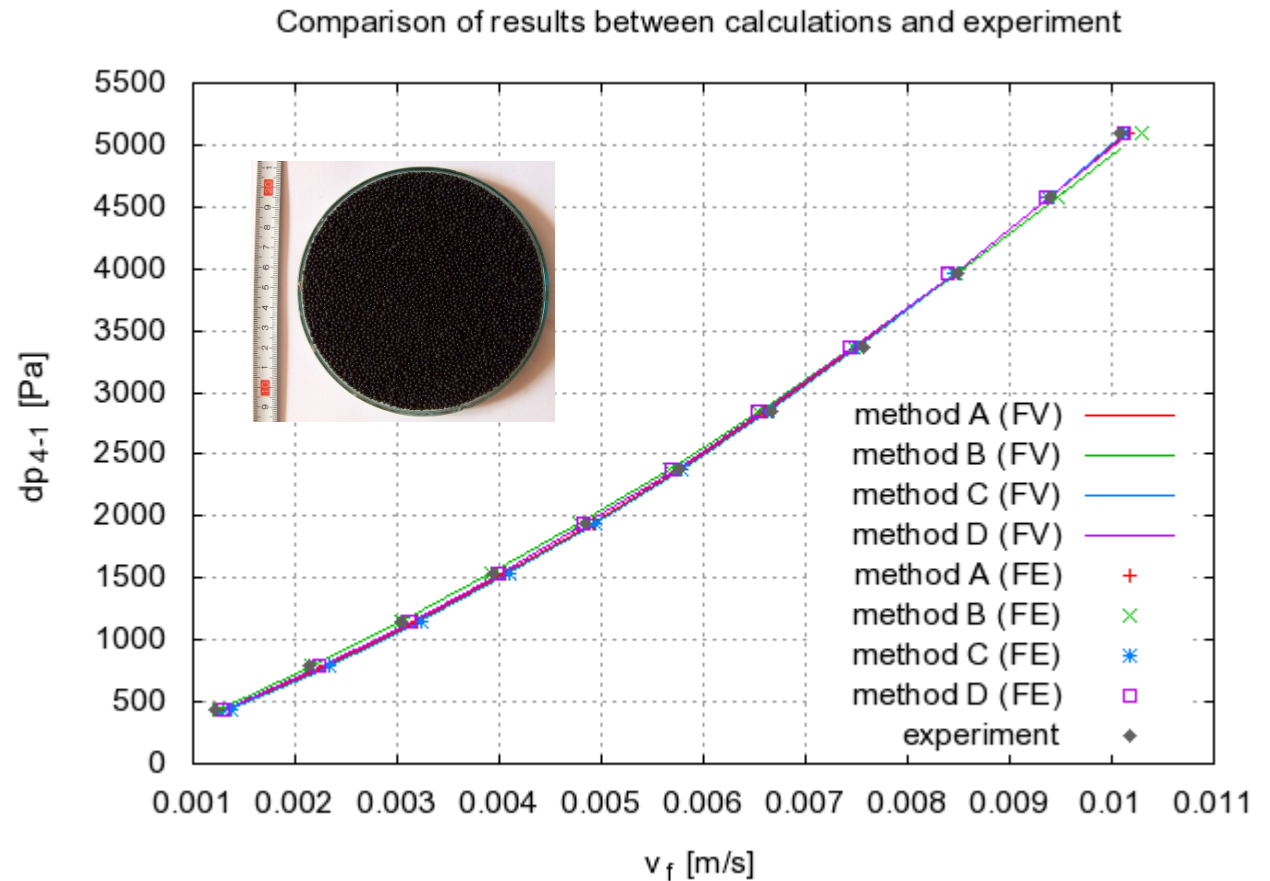


Strategia modelu bazowego



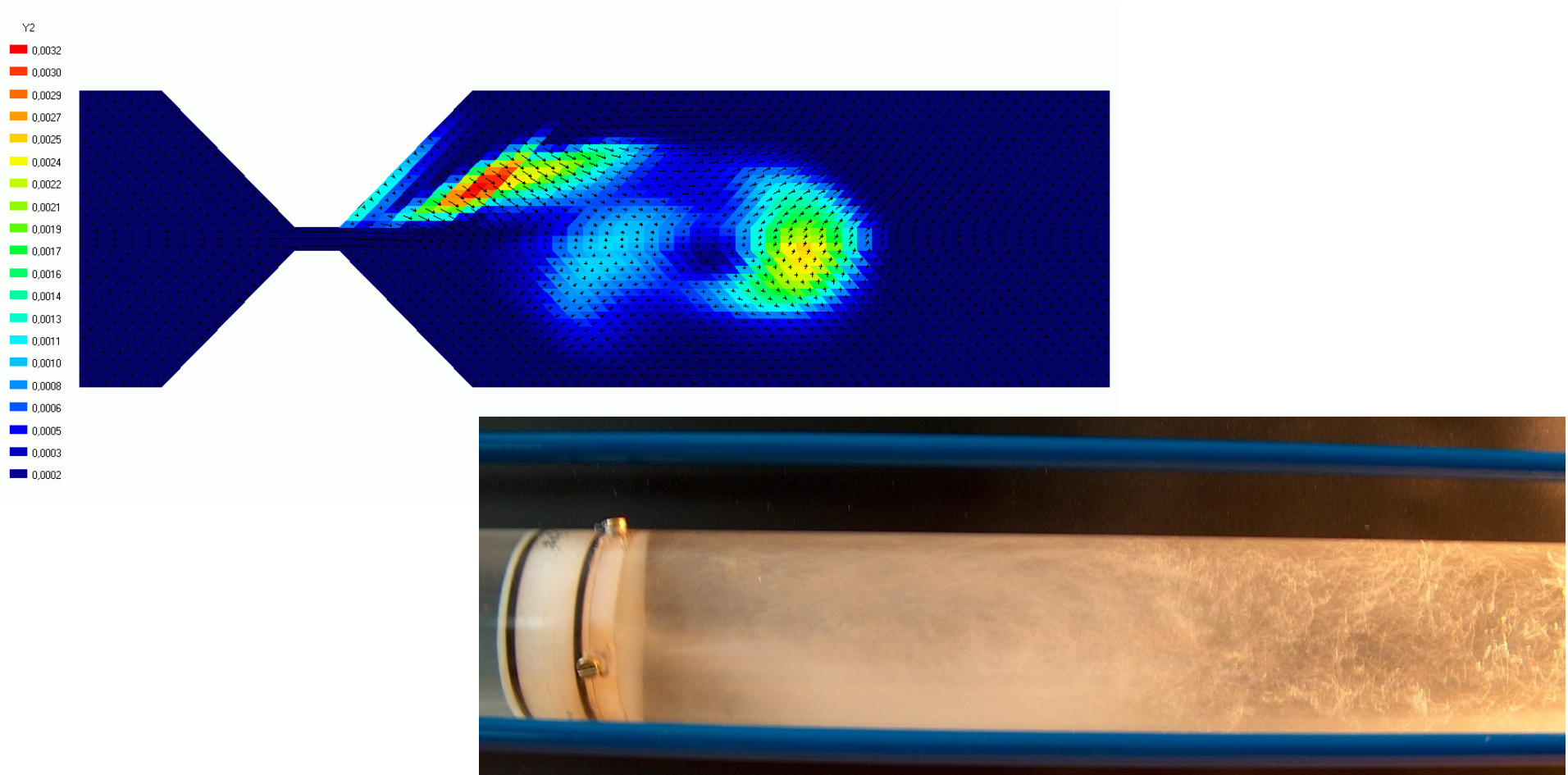
Przykład modelowania przepływu przez ośrodek porowaty – po zrobieniu modelu okazało się, że nie można porównać wyników obliczeń z wynikami wcześniej wykonanego eksperymentu, ze względu na zastosowany w eksperymencie sposób pomiaru ciśnień (względem otoczenia).

Strategia modelu bazowego



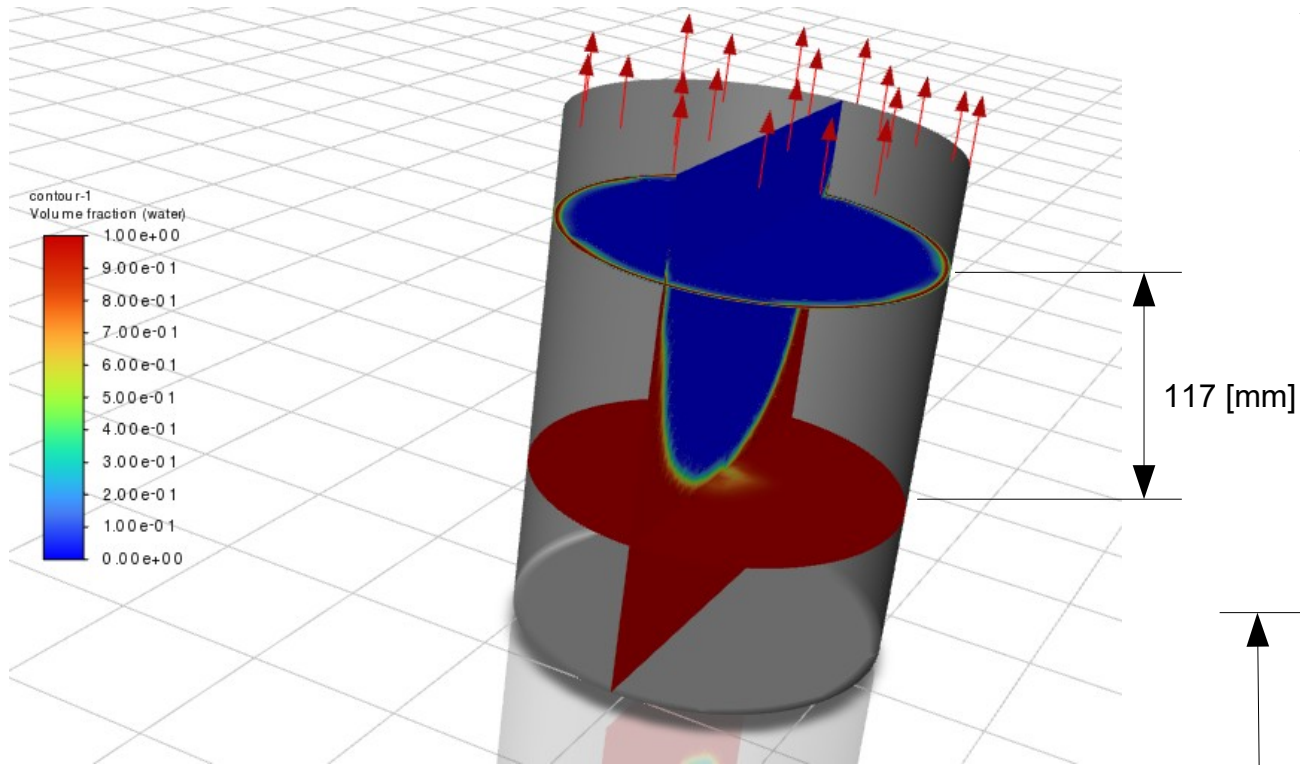
Przykład modelowania przepływu przez ośrodek porowaty – trzeba było powtórzyć eksperyment bo okazało się, że rotametr użyty do pomiarów prędkości działał niepoprawnie: po jego wymianie uzyskano poziom zgodności $< 3\%$.

Strategia modelu bazowego

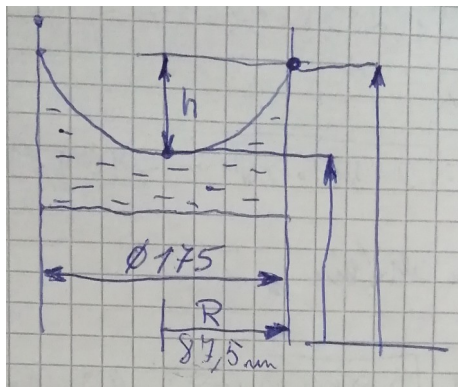


Przykład badań kawitacji kłębiastej – w trakcie badań wielokrotnie powtarzano eksperyment lub modyfikowano model, tak aby dopasować do siebie oba elementy i uzyskać jak największą zgodność jakościową oraz ilościową.

Strategia modelu bazowego



Przykład wykorzystania istniejącego eksperymentu do opracowania modelu numerycznego.



Eksperyment wykonano na zajęciach laboratoryjnych z Mechaniki Płynów [Paweł Pietkiewicz, 2022]

$$160 \text{ h} = 171 - 59 = 112$$

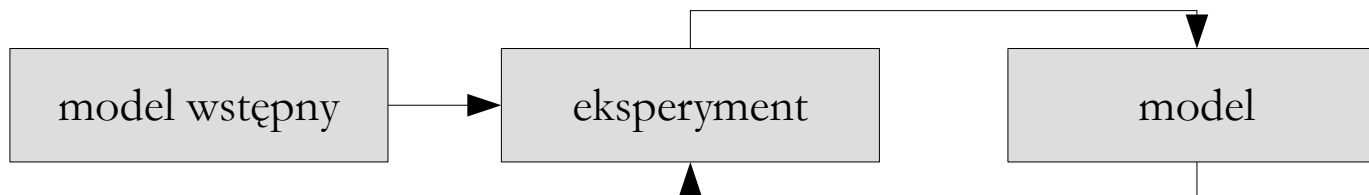
117 [mm]



Strategia modelu bazowego

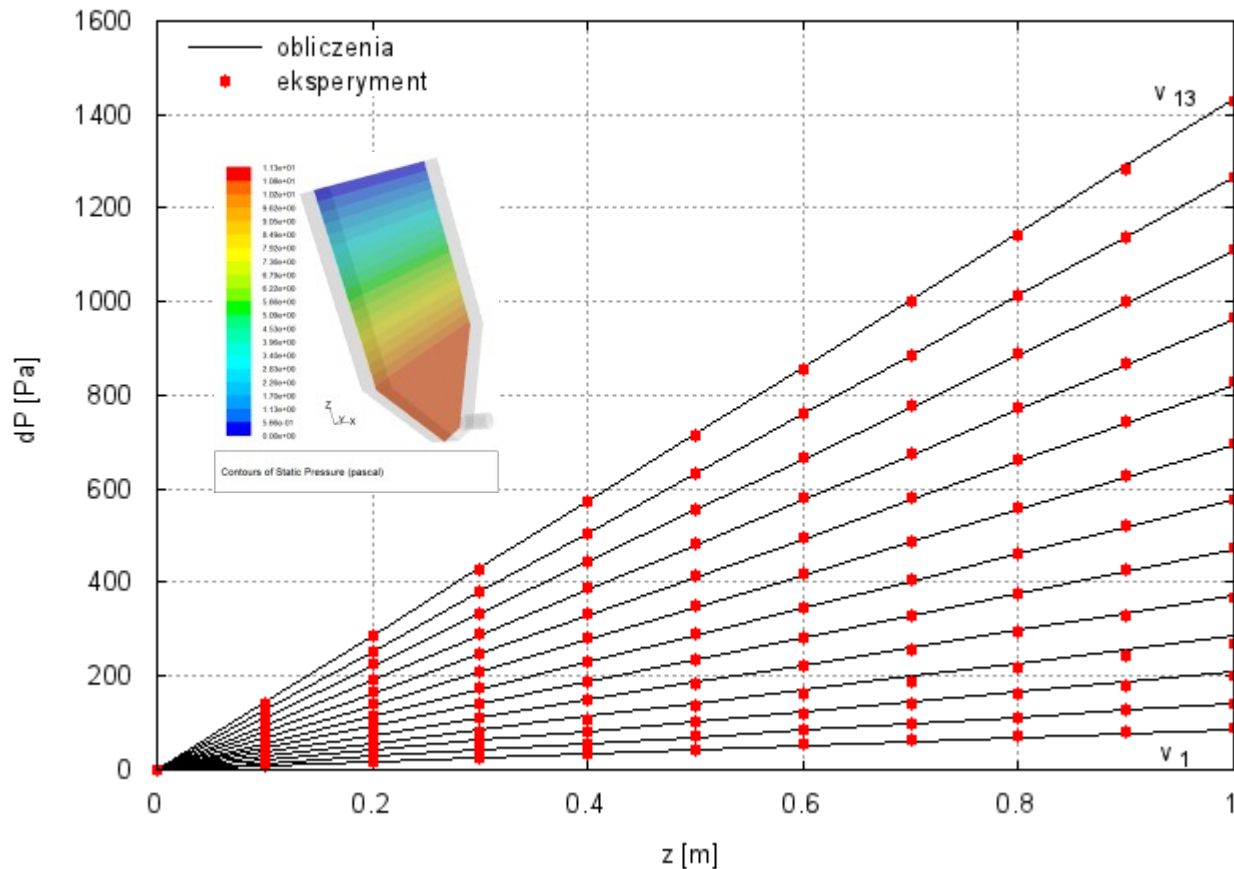
Wariant 4 strategii (z modelem wstępnym) – proces zaczyna się od rozpoznania, co i jak należy zmierzyć w eksperymencie, aby mógł on stanowić dobrą bazę do walidacji modeli numerycznych. Rozróżnia się dwa przypadki:

- domena obliczeniowa jest dokładnie określona – najczęściej tak jest, gdy model numeryczny powstaje na bazie projektu (istnieją rysunki, specyfikacje, wymagania, itp.),
- domena obliczeniowa nie jest określona dokładnie – najczęściej tak jest, gdy dopiero projektuje się układ lub szacuje możliwości badań numerycznych.



Strategia modelu bazowego

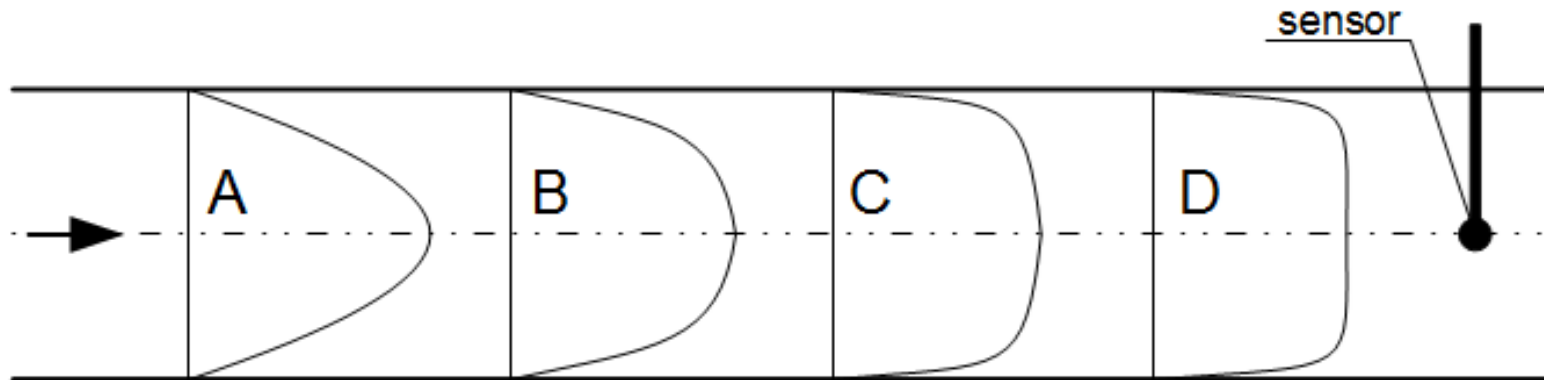
Porównanie wyników eksperymentu z wynikami modelu



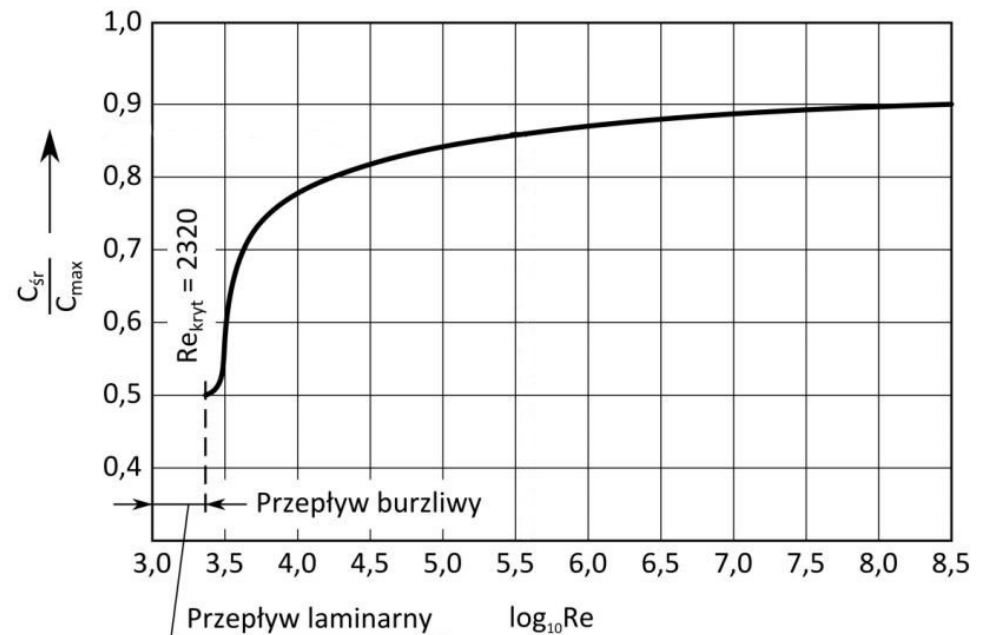
Przykład modelowania przepływu przez ośrodek porowaty:

- najpierw były koncepcje, ich analiza i wybór koncepcji finalnej,
- potem był projekt oraz model numeryczny,
- w dalszej kolejności zbudowano stanowisko pomiarowe,
- na końcu wykonano pomiary i skalibrowano model numeryczny.

Strategia modelu bazowego



Kalibracja modelu polegała na wykorzystaniu wykresu Nikuradsego do wyznaczenia średniej prędkości powietrza w przewodzie zasilającym (okazało się, że w badanym zakresie natężeń przepływu zmienia się profil prędkości)



Strategia odchyłeń od modelu bazowego

Strategia odchyłeń od modelu bazowego – metodyka modelowania oparta na eksperymencie, zakładająca istnienie modelu bazowego. Mając model bazowy i zmieniając w niewielkim zakresie różne jego elementy (geometrię, parametry, zakresy itp.) można przewidywać zachowanie się zmodyfikowanego układu.

Cel: poszukiwanie rozwiązań korzystniejszych względem funkcji celu.

Cechy:

- konieczność istnienia modelu bazowego,
- ryzyko całkowicie błędnej prognozy wynikające z możliwości wystąpienia zjawisk bifurkacyjnych.

Strategia odchyłeń od modelu bazowego

Idea strategii:

Jeżeli dla konkretnej geometrii oraz konkretnych parametrów przepływu wyniki symulacji komputerowej są zgodne z wynikami eksperymentu, to powinny one być zgodne w przypadku modelu opartego na nieco innej geometrii lub podobnych parametrach.

Oczywiście, im większe będą odchylenia od modelu potwierdzonego (bazowego), tym obliczenia będą obarczone większą niepewnością – modelowane przepływy będą wówczas przepływami hipotetycznymi.

Podczas stosowania strategii odchyłeń od modelu bazowego dobrze jest wykonać **analizę wrażliwości** modelu.

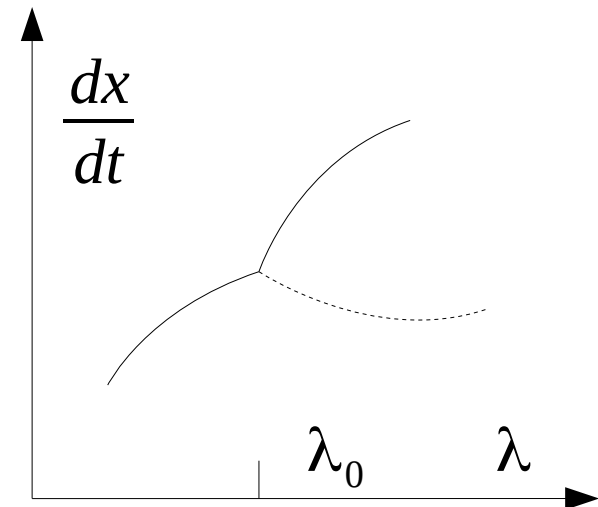
Strategia odchyłeń od modelu bazowego

W ujęciu matematycznym, zjawisko bifurkacji polega na rozdwojeniu gałęzi rozwiązań równowagi, przy przejściu parametru aktywnego (bifurkacyjnego) przez jego wartość krytyczną, przy jednoczesnej zmianie stateczności rozwiązań tworzących gałąź pierwotną.

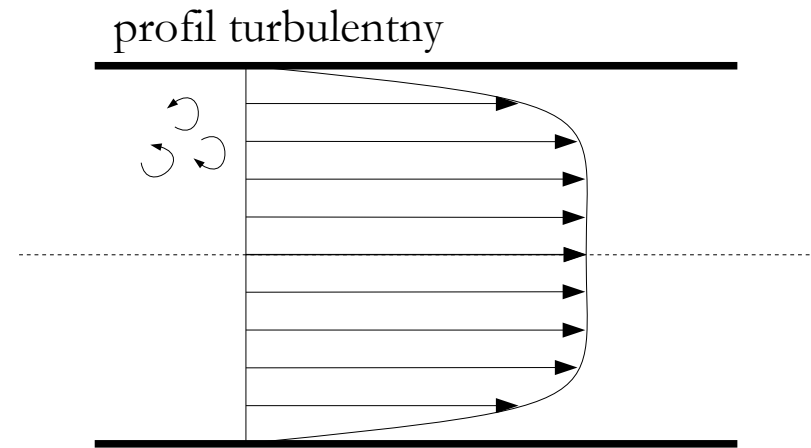
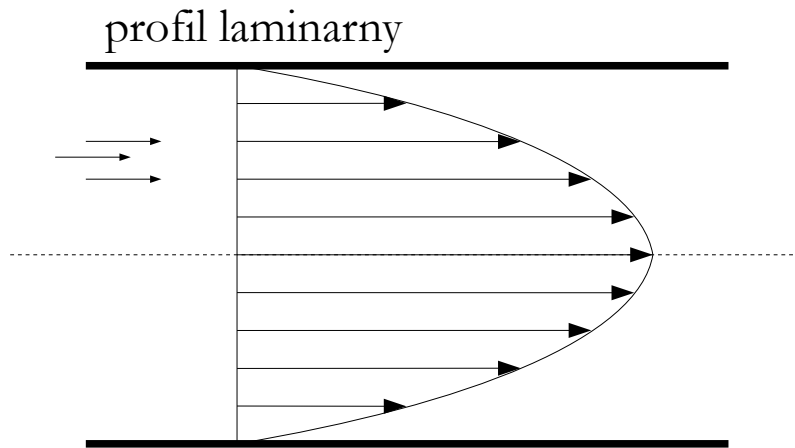
Bifurkacja zachodzi, kiedy rozwiązanie nieliniowego równania różniczkowego:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \lambda)$$

jakościowo zmienia swój charakter w miarę zmian parametru aktywnego λ .



Strategia odchyłeń od modelu bazowego



$$Re_{kr1} < 2340$$

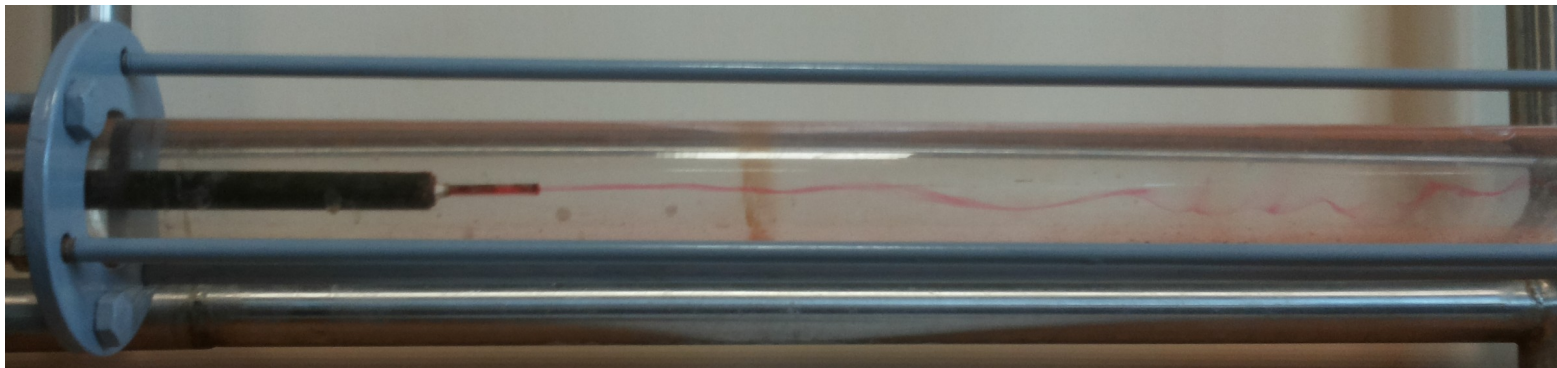
- przepływ laminarny

$$Re_{kr1} > 2340$$

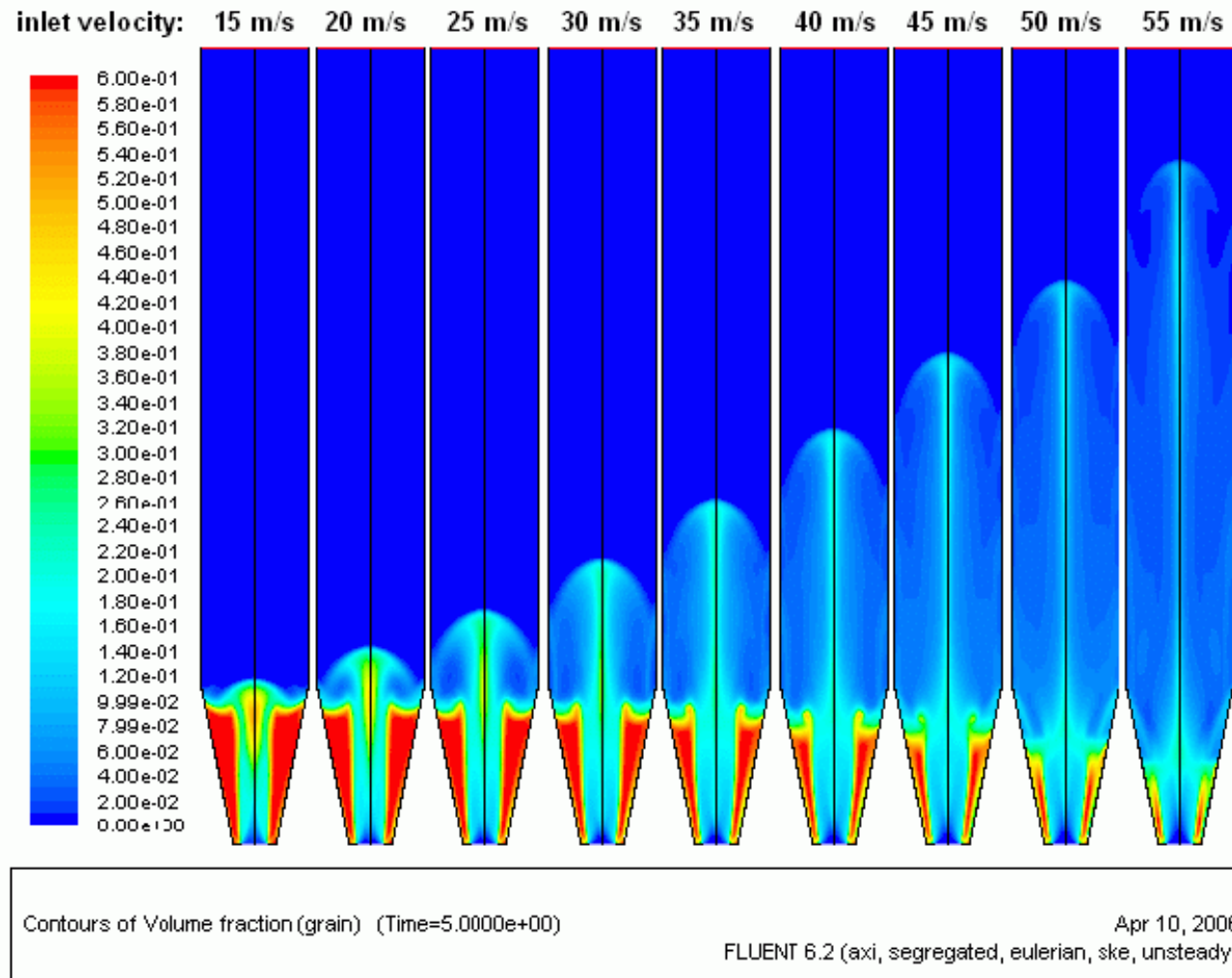
- przepływ turbulentny



dolna krytyczna liczba Reynoldsa

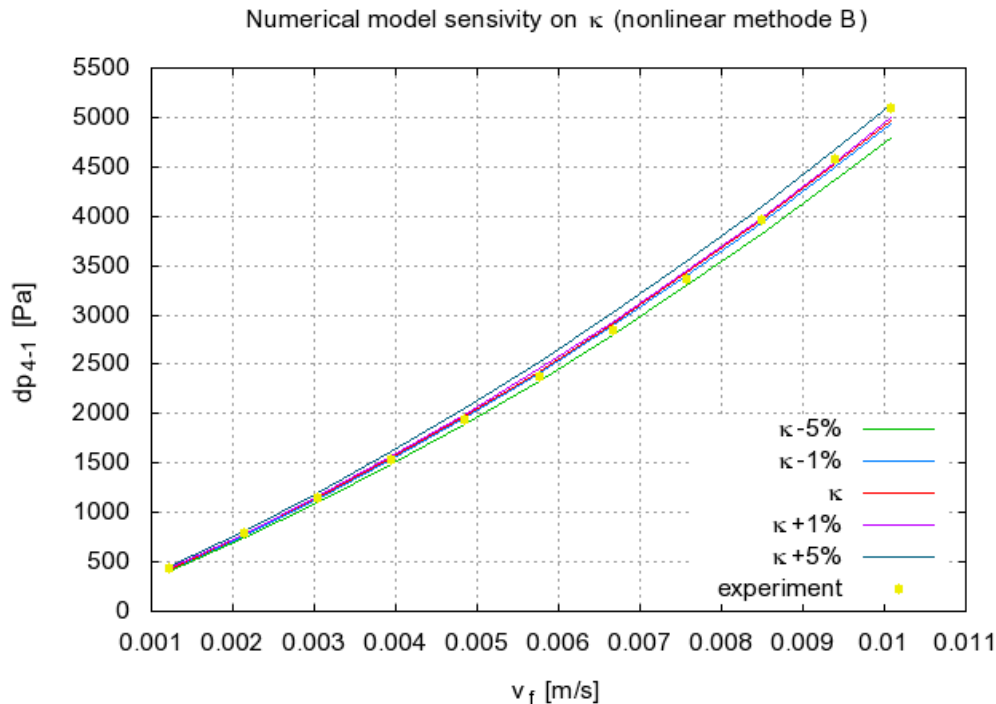


Strategia odchyłeń od modelu bazowego



Przewidywanie rozkładu fazy granularnej w złożu fontannowym przy różnych prędkościach powietrza zasilającego.

Strategia odchyłeń od modelu bazowego



Przykład analizy wrażliwości nieliniowego modelu przepływu płynu przez ośrodek porowaty (prawo Forchheimera).

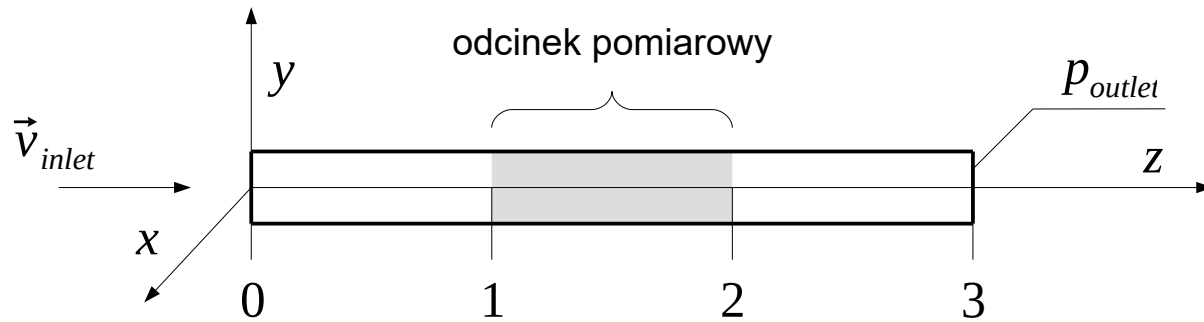
Równanie Forchheimera:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{\kappa} \cdot (\mu \cdot \vec{v}_f) + \beta \cdot (\rho \cdot \vec{v}_f^2)$$

κ - współczynnik przepuszczalności [m^2]

β - współczynnik Forchheimera [$1/\text{m}$]

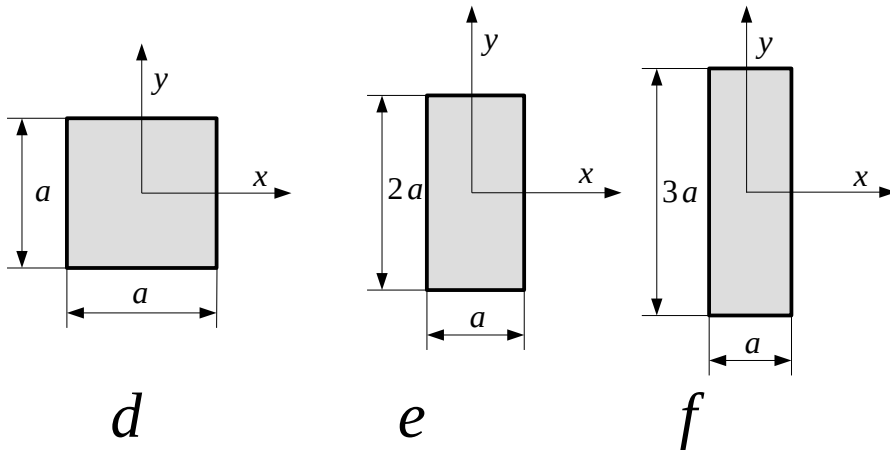
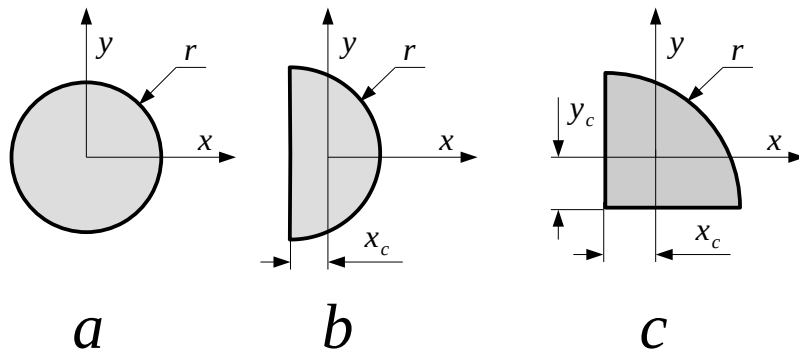
Strategia odchyień od modelu bazowego



Przykład obliczania spadków ciśnień podczas przepływu wody w rurach o różnych profilach.

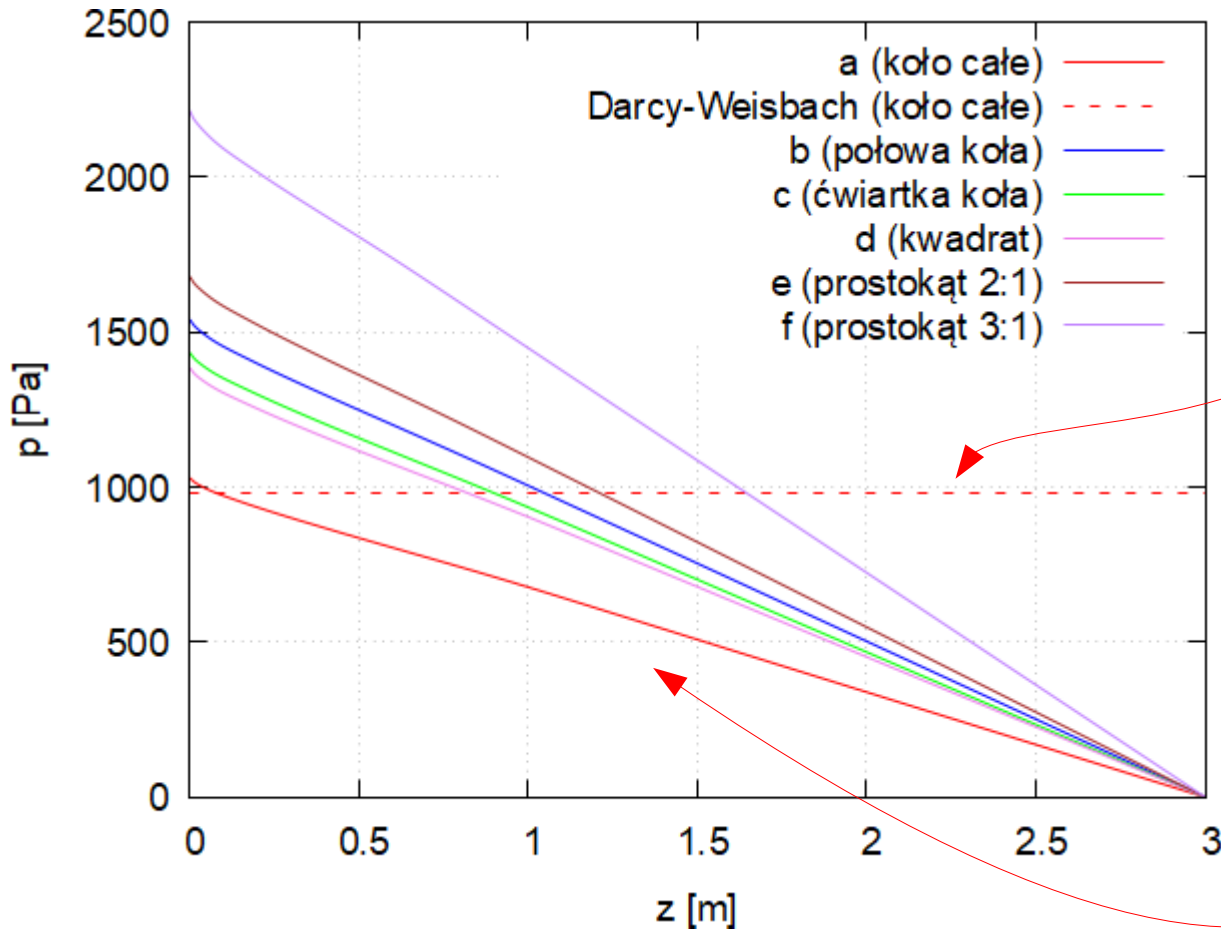
Założenia:

- taka sama długość rury
- takie samo pole przekroju rury (ale inne kształty przekroju)
- takie same parametry płynu
- taka sama liczba Reynoldsa (ale różne prędkości przepływu)



$$v_{inlet} = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot \frac{4 \cdot A}{L}}$$

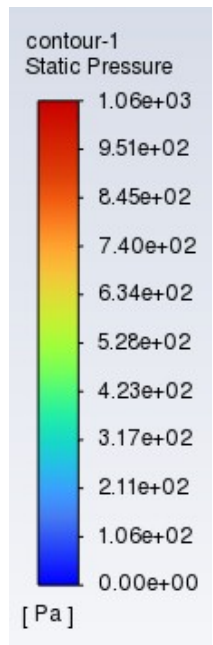
Strategia odchyłeń od modelu bazowego



$$dp = \frac{\rho \cdot v_{inlet}^2}{2} \cdot \lambda \cdot \frac{L}{d}$$

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

przypadek
zwalidowany



Strategia modelu jakościowego

Strategia modelu jakościowego – metodyka modelowania szacunkowego, w której dąży się do uzyskania jak najbardziej prawdopodobnych wyników.

Cel: szacowanie potencjału (wiele aspektów).

Cechy:

- brak konieczności istnienia eksperymentu,
- brak konieczności istnienia modelu bazowego,
- metodyka przeznaczona do nauki modelowania, testowania nowych sposobów i technik modelowania, nowych kodów lub do szacowania możliwości uzyskania nowego rodzaju rozwiązania,
- wiarygodność modelu oparta na przeglądzie literatury,
- duże ryzyko błędnych prognoz.

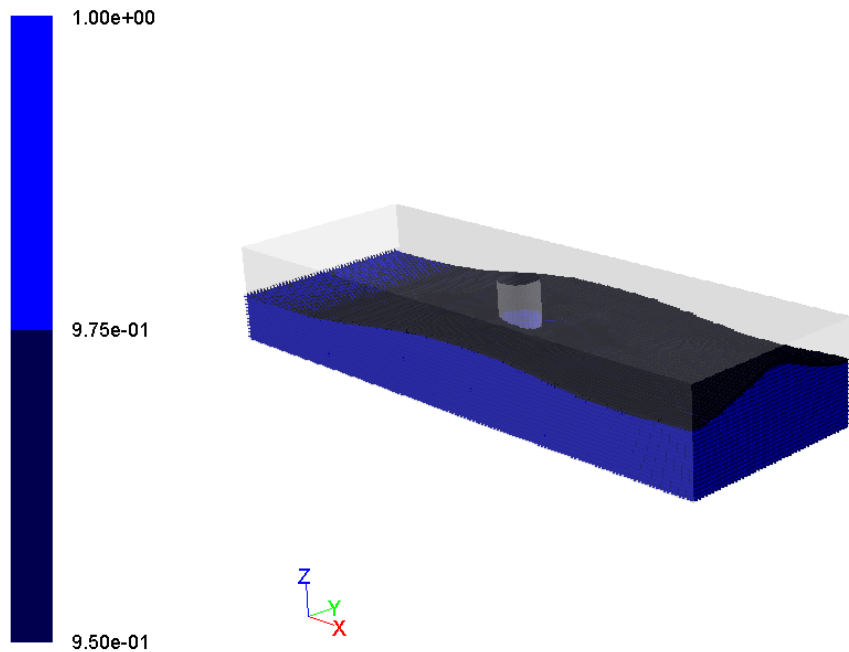
Strategia modelu jakościowego

Obszary stosowania strategii modelu jakościowego:

- poznawanie nowych podejść w modelowaniu (np. VoF),
- poznawanie możliwości modelowania określonych układów:
 - odtwórczo (np. suszarka fontanna do ziarna)
 - pioniersko (np. strumienice)
- planowanie eksperymentu pod model numeryczny (np. bifurkacje Hopfa)
- sprawdzanie wymagań modelu (np. płuczka)
- wstępne potwierdzenie nowych pomysłów lub teorii (np. przenośnik)
- ...

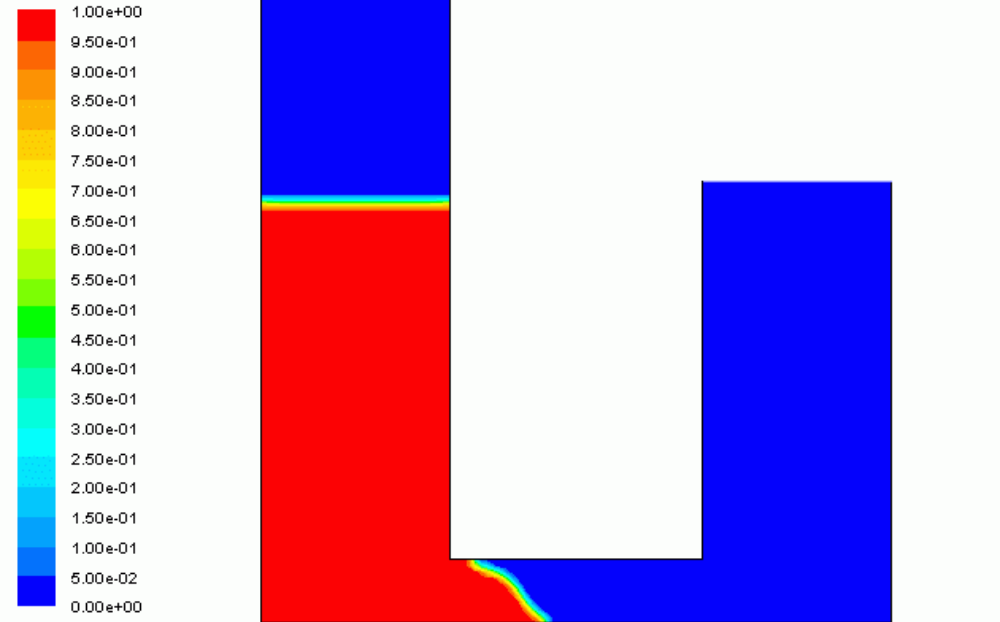
Warunki wiarygodności modelu jakościowego: każdy wybór (modelu matematycznego, metody numerycznej, technik obliczeniowych, oprogramowania, itp.) należy jak najlepiej uzasadnić.

Strategia modelu jakościowego



Contours of Volume fraction (water)

Sep 15, 2010
ANSYS FLUENT 12.1 (3d, pbns, vof, ske)

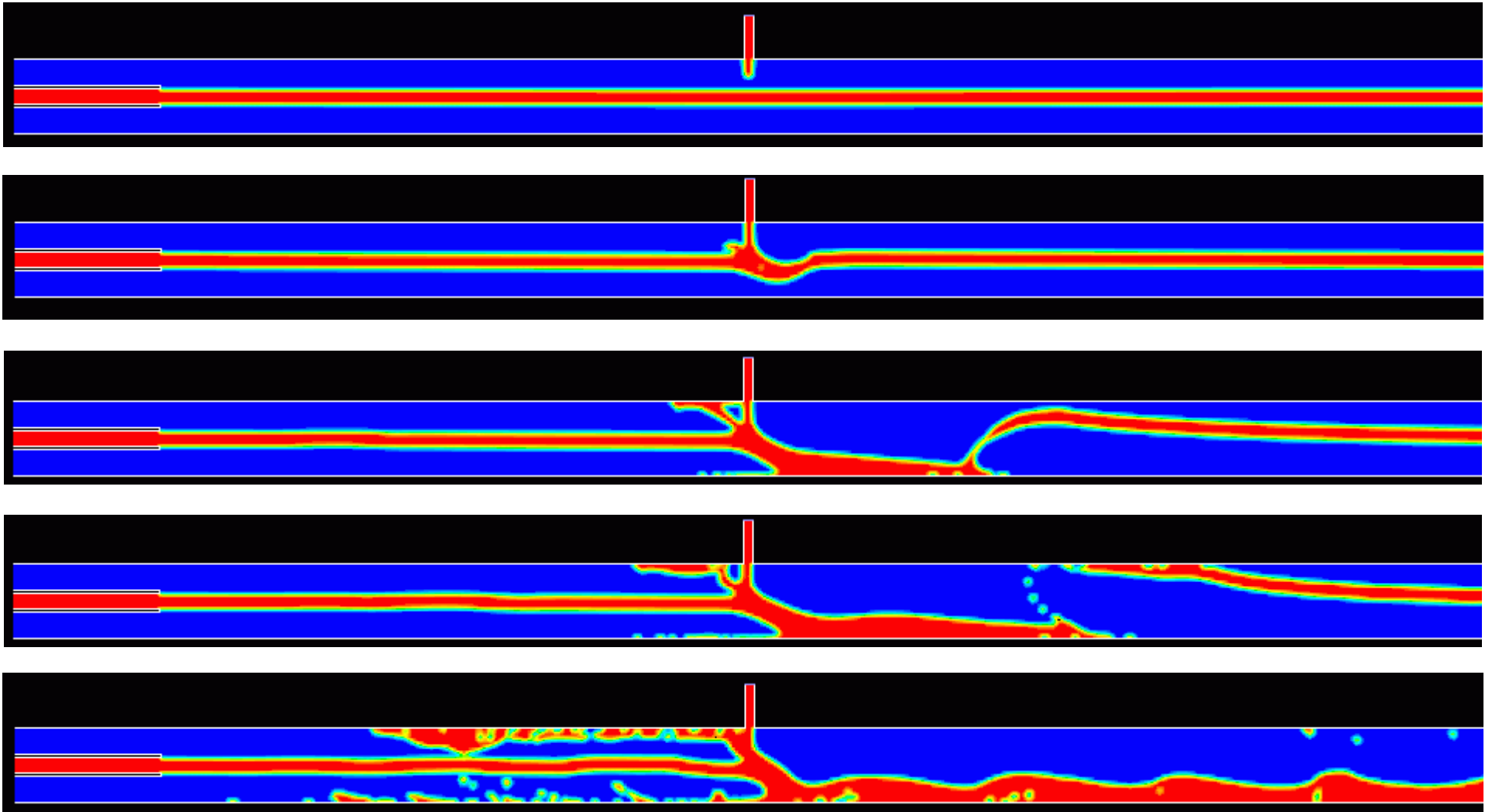


Contours of Volume fraction (water) (Time=3.4100e-02)

Jul 11, 2006
FLUENT 6.2 (2d, segregated, vof, ske, unsteady)

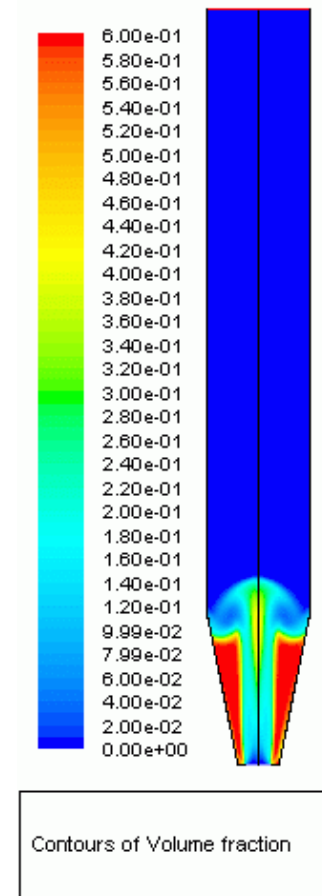
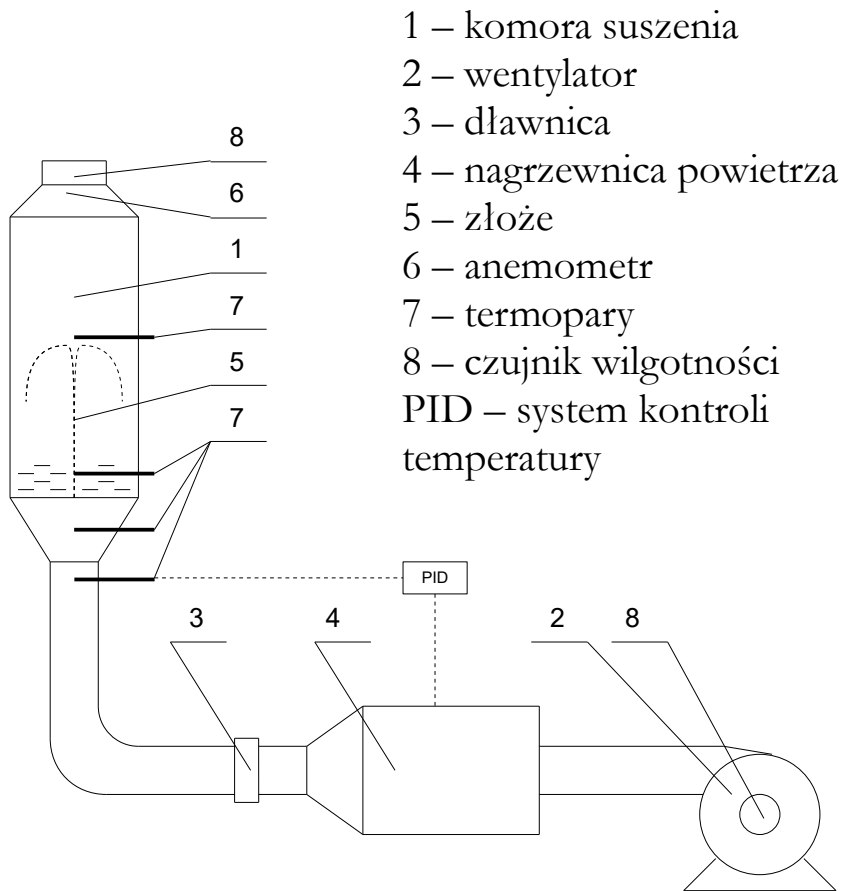
Przykłady modelowania układów z powierzchnią swobodną – testy modelu Volume of Fluid.

Strategia modelu jakościowego



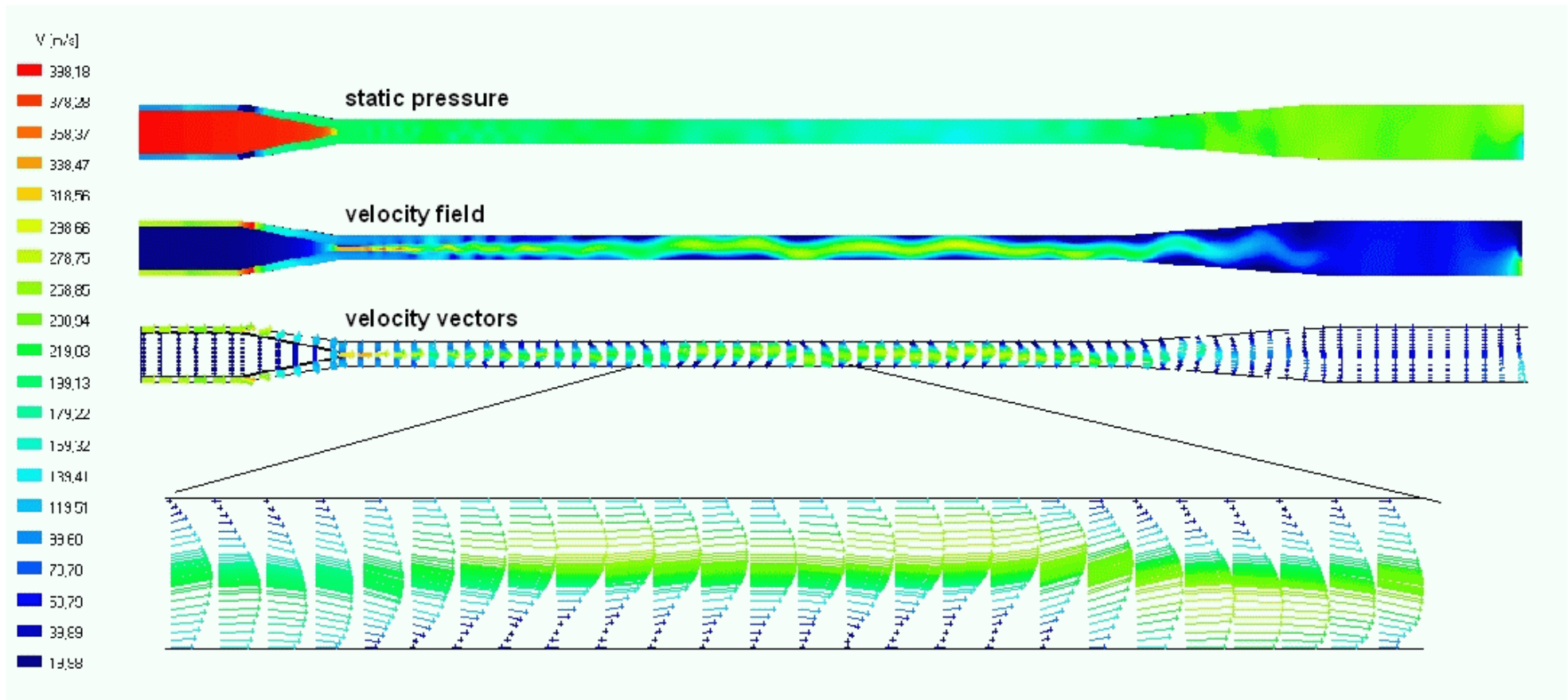
Przykłady modelowania układu z powierzchnią swobodną – testy modelu Volume of Fluid.

Strategia modelu jakościowego



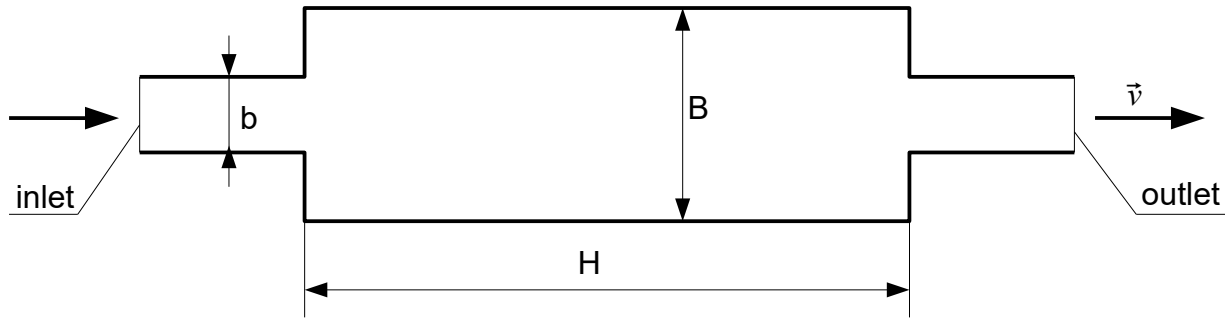
Przykład modelowania dynamiki fontannowej suszarki do ziarna – nauka korzystania z Wielofazowego Modelu Eulera oraz tzw. modelu Gidaspowa: początkowy błąd rzędu 65%.

Strategia modelu jakościowego

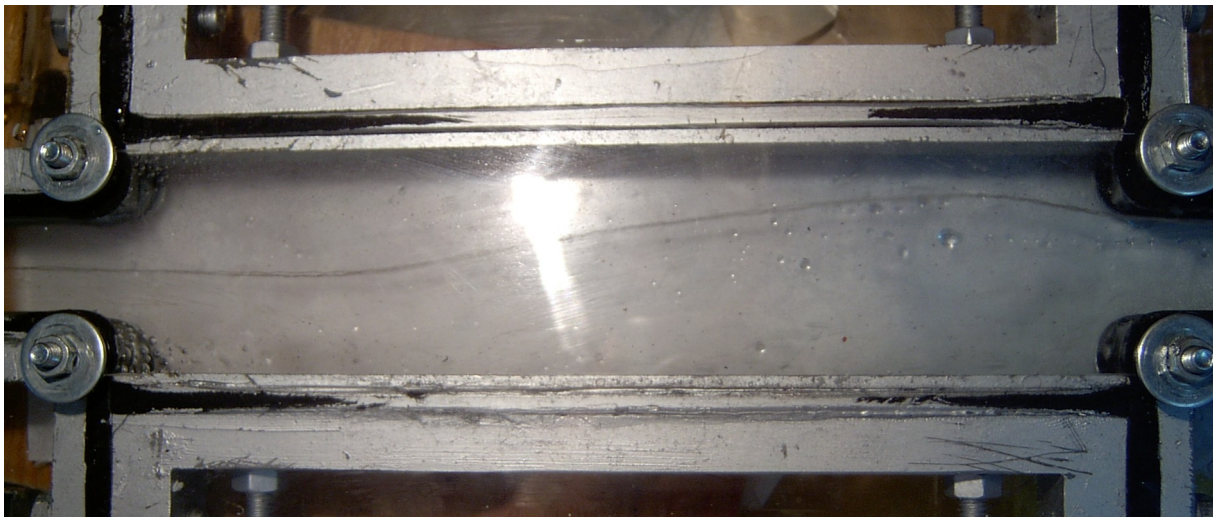
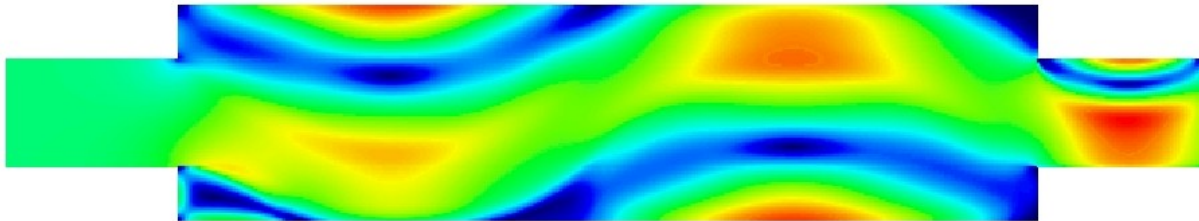


Przykład modelowania pracy strumienicy – symulacja jakościowo jest poprawna, gdyż następuje zasysanie i transport strumienia biernego przez strumień roboczy.

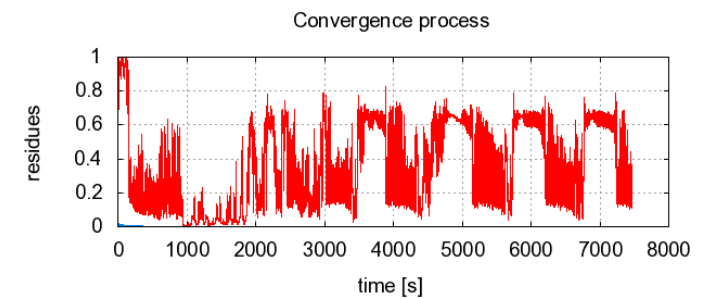
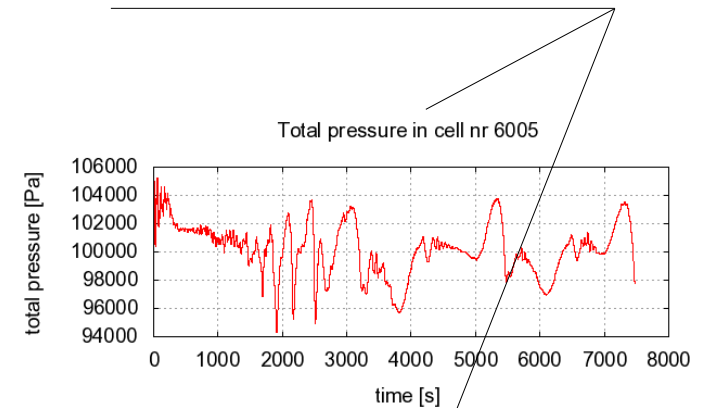
Strategia modelu jakościowego



Modelowanie bifurkacji Hopfa w kanale z rozszerzeniem (oraz budowa stanowiska na podstawie wyników symulacji).

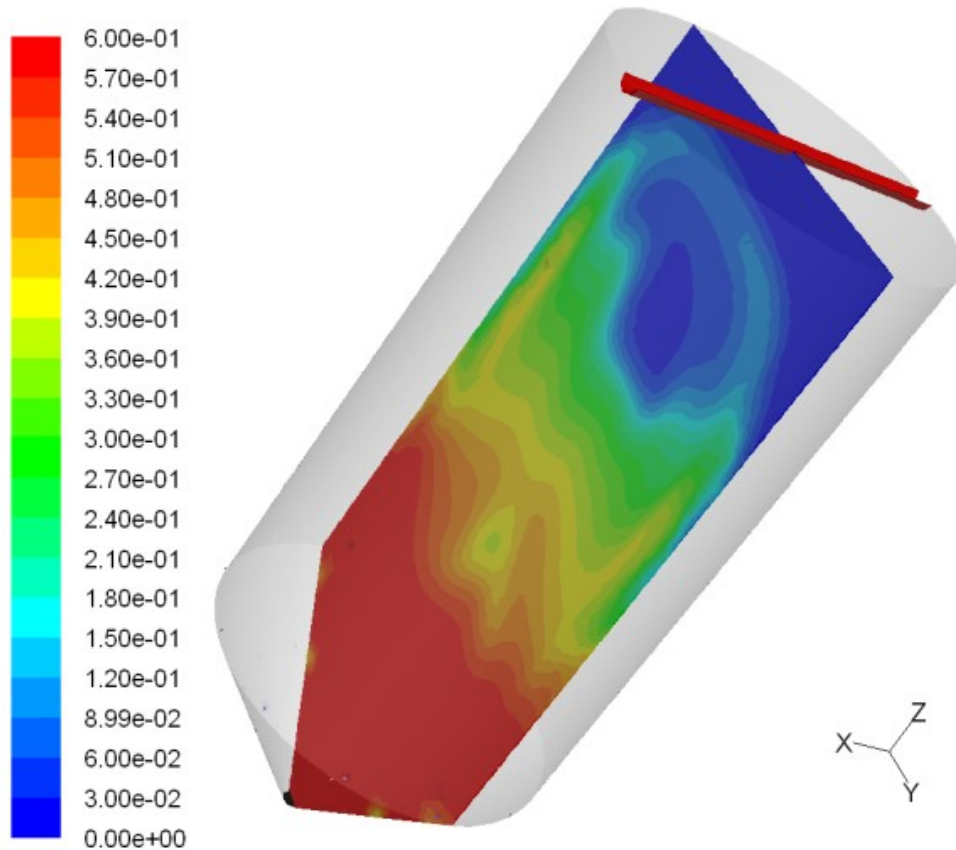


nowe metody śledzenia bifurkacji

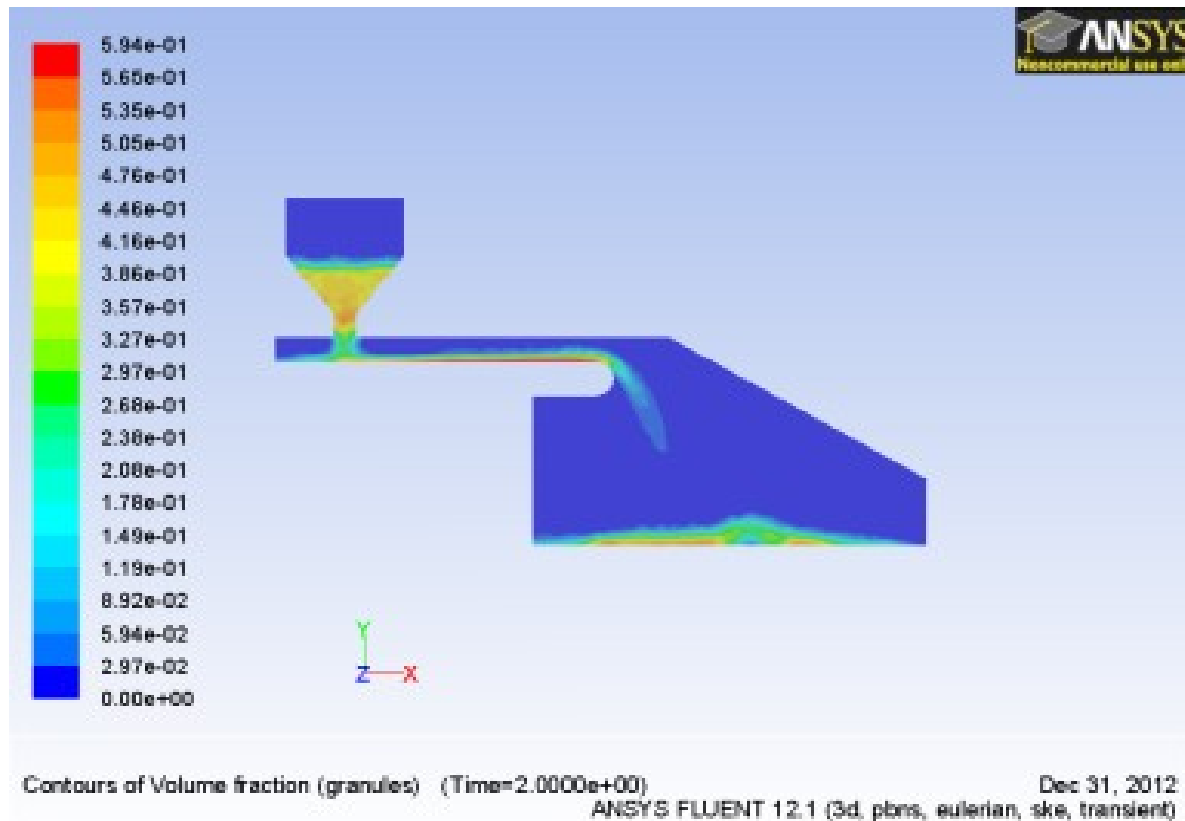


Strategia modelu jakościowego

Rozpoznanie możliwości modelowania kolumny płuczaco-chłodzącej – celem symulacji było sprawdzenie jakie dane muszą zostać zebrane, aby dało się zbudować model symulacyjny.

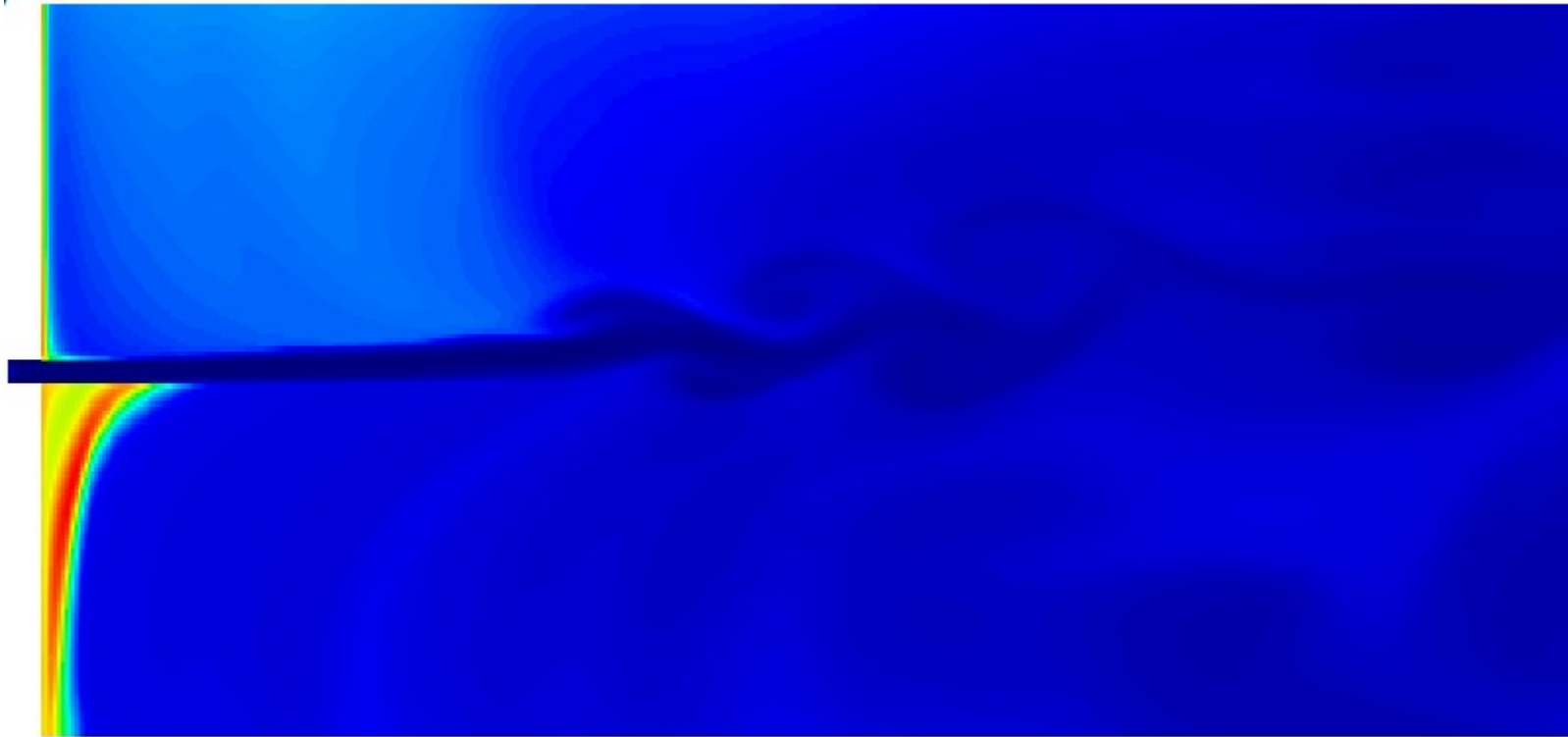


Strategia modelu jakościowego



Przykład modelowania transportu granulatu na przenośniku taśmowym – testy zastosowania Wielofazowego Modelu Euler do zagadnień z obszaru klasycznej mechaniki ośrodków sypkich.

Strategia modelu jakościowego



Przykład
modelowania
oscylacji
samowzbudnych



Uwagi do strategii

- Najlepsza jest strategia oparta na modelu wstępnym (wariant 4 strategii modelu bazowego).
- Na każdym etapie prac należy wykonywać dodatkowe porównania i testy, potwierdzające techniczną poprawność działania narzędzi numerycznych.
- Należy dobrze przemyśleć sposób porównywania wyników eksperymentu i wyników symulacji – proces ten powinno się maksymalnie zautomatyzować, tak aby wyeliminować możliwość błędów ludzkich.
- W przypadku wykonywania eksperymentu przez innych ludzi, należy dokładnie omówić techniczne szczegóły uzyskiwania pomiarów.

Uwagi do strategii

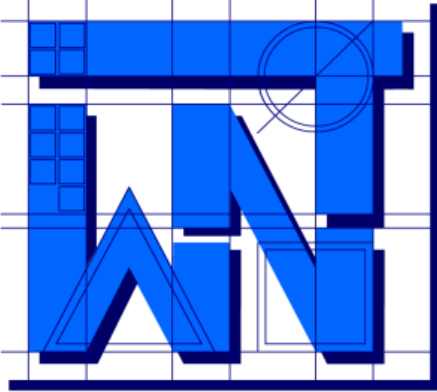
- Podstawą działalności badawczej prowadzonej metodami numerycznymi może być tylko model symulacyjny zwalidowany eksperymentalnie na poziomie jakościowym i ilościowym.
- Metodami numerycznymi nie da się modelować zjawisk, które nie zostały wcześniej rozpoznane, opisane matematycznie, zapisane w kodzie obliczeniowym i zweryfikowane (jest to przyczyna wielu nieporozumień).
- Metodami numerycznymi nie da się modelować zjawisk, których obecności nie jesteśmy świadomi (przykładowo: nie pojawi się w wynikach symulacji zjawisko kawitacji, o ile nie włączymy i nie skonfigurujemy odpowiednich modeli opisujących to zjawisko).
- Dobre opanowanie „warsztatu” wymaga mnóstwa czasu (w konsekwencji czego dochodzi do specjalizacji).

Podsumowanie

Zagadnienia:

Model bazowy, weryfikacja i walidacja, zgodność jakościowa i ilościowa, główne strategie modelowania, strategia modelu bazowego, strategia odchyleń od modelu bazowego, strategia modelu jakościowego, uwagi do strategii.

Wydział Nauk Technicznych



UNIVERSITY OF WARMIA AND MAZURY IN OLSZTYN
The Faculty of Technical Sciences
POLAND, 10-957 Olsztyn, M. Oczapowskiego 11
tel.: (48)(89) 5-23-32-40, fax: (48)(89) 5-23-32-55
URL: <http://www.uwm.edu.pl/edu/sobieski/> (in Polish)



Dziękuję za uwagę

Wojciech Sobieski

Olsztyn, 2003-2024