

LABORATORYJNE WZORCE DO WALIDACJI PROGRAMÓW ODLEWNICZYCH

Tomasz A. Kowalewski, Andrzej Cybulski, Tomasz Michałek, Maciej Kowalczyk

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk
Warszawa, 2005

Spis treści

Streszczenie	iii
Abstract	v
Lista ważniejszych oznaczeń	vi
1. Wstęp	1
1.1. Motywacja	1
1.2. Wybór konfiguracji	2
2. Metody eksperymentalne	4
2.1. Opis metod pomiarowych	4
2.1.1. Pomiar pól prędkości	4
2.1.2. Pomiar pól temperatury	5
2.1.3. Wizualizacja struktur przepływu	6
2.2. Układy pomiarowe i systemy akwizycji danych	6
2.2.1. Rejestracja obrazów	7
2.2.2. Punktowa rejestracja temperatury	9
2.3. Wybrane geometrie naczyń	9
2.3.1. Sześcian grzany różnicowo (SRG)	10
2.3.2. Sześcian z izotermiczną górną ścianką (SIG)	10
2.3.3. Pochylony prostopadłościan (PBP i PZP)	12
2.3.4. Sześcian otwarty (SP)	14
2.4. Ciecze modelowe i materiały stosowane w badaniach	15
3. Numeryczne modelowanie procesów krzepnięcia	18
3.1. Postawienie problemu dla celów numerycznej mechaniki płynów	19
3.1.1. Modelowanie procesu krzepnięcia	20
3.1.2. Modelowanie przepływów ze swobodną powierzchnią	22
3.2. Modele fizyczne i metody wykonywania symulacji procesów odlewniczych	23
3.3. Metody dyskretyzacji	24
4. Charakterystyka programów symulacyjnych	26
4.1. Programy komercyjne dla odlewnictwa	26
4.1.1. Modele fizyczne i metody wykonywania symulacji	26
4.1.2. Odwzorowanie geometrii układu odlew-forma	27
4.1.3. Cechy użytkowe programów komercyjnych dla odlewnictwa	29
4.2. Uniwersalne programy komercyjne i akademickie	31
5. Przebieg eksperymentów	34
5.1. Sześcian grzany różnicowo (SRG)	34
5.2. Sześcian z izotermiczną ścianką górną (SIG)	35

5.3. Pochylony prostopadłościan (PBP i PZP)	42
5.3.1. Proces wypełniania bez krzepnięcia	43
5.3.2. Proces wypełniania z krzepnięciem	45
5.4. Sześcian z górną powierzchnią swobodną (SP)	51
5.4.1. Wypełnianie i proces krzepnięcia wody	51
5.4.2. Proces wypełniania turbulentnego bez krzepnięcia	52
5.4.3. Proces wypełniania laminarnego z krzepnięciem	54
5.5. Wybór wzorców eksperymentalnych	55
6. Weryfikacja i walidacja obliczeń numerycznych	60
6.1. Definicja wzorca numerycznego	60
6.2. Weryfikacja programów	60
6.2.1. FRECON3V (metoda różnic skończonych)	61
6.2.2. FLUENT (metoda objętości skończonych)	62
6.2.3. FIDAP (metoda elementów skończonych)	62
6.2.4. SOLVSTR (metoda różnic skończonych)	62
6.2.5. SOLVMEF (metoda bezsiatkowa, aproksymacja DAM)	63
6.2.6. Analiza średnich błędów rozwiązań numerycznych	63
6.3. Walidacja – porównanie wyników numerycznych z eksperymentem	65
6.3.1. Modelowanie krzepnięcia	66
(1) Sześcian grzany różnicowo, wypełniony wodą	66
(2) Sześcian z izotermiczną ścianką górną (SIG), wypełniony PEG-900	68
(3) Sześcian z izotermiczną ścianką górną, wypełniony wodą	73
(4) Sześcian z izotermiczną ścianką górną, symulacja programami odlewniczymi krzepnięcia PEG-900	75
(5) Sześcian z górną powierzchnią swobodną (SP), symulacja programem NOVAFLOW krzepnięcia wody i aluminium	78
6.3.2. Modelowanie wypełniania	80
(6) Prostopadłościan z przegrodami wypełniany wodą i gliceryną	80
(7) Prostopadłościan bez przegród – proces krzepnięcia wody	85
7. Wnioski końcowe	90
8. Literatura	92
Dodatek A Uzupełnienie opisu eksperymentalnej części badań	96
Dodatek B Uzupełnienie opisu numerycznej części badań	104

Streszczenie

Prezentowane w niniejszej pracy badania wiążą się ściśle z dziedziną transportu ciepła w procesach metalurgicznych. Procesy te charakteryzują się silnie nieliniowym sprzężeniem zjawisk przepływowych ze zjawiskami przemiany fazowej, na ogół w złożonych geometriach i w obecności swobodnej powierzchni. Przedmiotem modelowania numerycznego w odlewnictwie są podstawowe procesy służące do nadania kształtu i własności odlew, tj. zalewanie formy, krzepnięcie (kształtowanie struktury materiału) oraz stygnięcie (związane z powstawaniem naprężeń i skurczy odlewniczych). Ze względu na złożoność problemu, modelowanie numeryczne zjawisk fizycznych zachodzących w tych procesach wiąże się przyjęciem wielu założeń upraszczających, często znacznie modyfikujących podstawowe parametry badanego problemu. Silna nieliniowość zjawisk powoduje, że oszacowanie błędów spowodowanych nieuniknionymi uproszczeniami w modelach numerycznych jest trudne lub niemożliwe. Istotnym kryterium przydatności danego modelu numerycznego staje się więc jego weryfikacja eksperymentalna. Weryfikacja jest też potrzebna przy empirycznym dopasowaniu parametrów wymaganych w obliczeniach modelowych, tzn. wyznaczeniu charakterystyk materiałowych, czy termicznych warunków brzegowych w taki sposób, by zapewniały maksymalną zgodność wyników numerycznych z obserwacjami na stanowisku eksperymentalnym lub w odlewni.

Z drugiej strony, badania prowadzone w warunkach laboratoryjnych stanowią część procesu tworzenia modeli symulacyjnych. Wobec olbrzymiej liczby czynników wpływających na jakość odlewów istnieje konieczność wyodrębnienia najistotniejszych cech procesu fizycznego i opracowania metody kontroli prawidłowości ich odtworzenia w rozwiązaniu numerycznym. Taka procedura związana jest z koniecznością doskonalenia zarówno modeli symulacyjnych jak i technik zbierania danych empirycznych.

Weryfikacja rezultatów symulacji numerycznych w warunkach przemysłowych jest bardzo trudna i często możliwa jedynie dla globalnych parametrów. W związku z tym w ramach tej pracy zaproponowano i stworzono cztery grupy laboratoryjnych modeli eksperymentalnych o dobrze zdefiniowanych parametrach przepływowych. Uproszczona geometria i odpowiedni dobór zastosowanych materiałów umożliwiły precyzyjny pomiar pól prędkości, temperatur, struktury przepływu i geometrii frontów fazowych. W tak zdefiniowanych modelach starano się by mimo koniecznych uproszczeń zachować większość cech charakteryzujących zjawiska fizyczne towarzyszące procesom typowym dla odlewnictwa.

Zdefiniowane tą drogą eksperymentalne wzorce (*benchmarks*) procesów odlewniczych wykorzystano do analizy wiarygodności symulacji numerycznych przeprowadzonych przy wykorzystaniu dostępnych komercyjnych kodów numerycznych (FLUENT, FIDAP, VULCAN, PROCAST), kodów uniwersyteckich (FRECON, ICE3D), a także dla rozwoju własnego oprogramowania (SOLVSTR, MESHFREE).

Rezultaty badań eksperymentalnych, stworzone wzorce i przeprowadzona analiza wiarygodności wybranych kodów numerycznych wykazały istnienie szeregu niedoskonałości w istniejących i powszechnie stosowanych narzędziach inżynierskich, używanych do modelowania procesów krzepnięcia. Konieczne dla przyspieszenia obliczeń uproszczenia modeli wiążą się z ryzykiem generacji rezultatów znacznie odbiegających od przebiegu zjawiska fizycznego. Przeprowadzone badania wskazały na przydatność kontrolnych badań eksperymentalnych, pozwalających oszacować wpływ uproszczeń wprowadzanych w modelach numerycznych.

W pierwszej części niniejszej pracy przedstawiono opis stanowiska pomiarowego oraz metodykę i zakres przeprowadzonych badań laboratoryjnych, zilustrowanych przykładami uzyskanych wyników. Główny rezultat badań, szczegółowe tabele wartości zmierzonych parametrów przepływu (pola prędkości, temperatury, położenia frontu fazowego) zebrano w załączniku. Dane te stanowią w zamierzeniu autorów pracy podstawę do weryfikacji kodów

numerycznych stosowanych zarówno w ośrodkach akademickich jak i w przemyśle do modelowania przepływów z przemianą fazową.

Kolejny rozdział pracy poświęcono opisowi podstaw teoretycznych typowych modeli numerycznych i dyskusji problemów związanych z weryfikacją tych modeli. Biorąc pod uwagę trudny do oszacowania wpływ niedokładności niektórych schematów numerycznych, zaproponowano nowy wzorzec (*benchmark*) numeryczny dla weryfikacji symulacji problemów konwekcji naturalnej. Wykorzystanie takiego wzorca umożliwia weryfikację zastosowanej metodyki symulacji numerycznej już na etapie budowania schematu i ułatwia optymalizację dyskretyzacji geometrii. Na tym etapie pracy przeprowadzono również test nowej w numerycznej mechanice płynów techniki numerycznej, rokującego duże nadzieje dla modelowania procesów przemysłowych, tzw. metody dyskretyzacji bezsiatkowej. Rezultaty przeprowadzonych testów porównawczych kilku używanych w pracy kodów numerycznych wskazały na przewagę metody objętości skończonych w zakresie dokładności obliczeń a metody elementów skończonych w zakresie czasu obliczeń. Metoda bezsiatkowa w obecnej realizacji numerycznej charakteryzuje się małą dokładnością rozwiązań i bardzo długimi czasami obliczeń. Wskazuje to na konieczność dalszych prac nad udoskonaleniem tego nowego w numerycznej mechanice płynów podejścia.

Pełne zestawienie zbiorczych kart pomiarowych, tabel uzyskanych wyników z pomiarów laboratoryjnych oraz wyników obliczeń numerycznych stanowi odrębne opracowanie. W dodatku A, zamieszczonym na końcu niniejszej pracy, wskazane zostały podstawowe wyniki z proponowanych wzorców eksperymentalnych. Szczegółowe wyniki eksperymentów oraz porównań z obliczeniami numerycznymi są dostępne do wykorzystania przez inne ośrodki na stronach WWW (<http://fluid.ippt.gov.pl/benchmark>).

Laboratory benchmarks for validating numerical simulation of casting problems

Abstract

Numerical modelling of casting problems implies introduction of several assumptions and simplifications. However, strong non-linearity of the governing equations combined with a moving boundary make *a priori* prediction of consequences of inaccuracy or simplifications used in the numerical models almost impossible. This obviously appeals laboratory experiments to verify and validate numerical methodology used. Unfortunately most industrial problems involve configurations and substances which are very difficult to investigate experimentally. Therefore three experimental benchmarks has been constructed, based on so called *analog* fluids which are transparent and have well known physical properties: succinonitrile, poliethylen glycol, water and glycerine. The mould filling and freezing was investigated in small rectangular containers: inclined channel with forced flow, freezing at two isothermal, parallel walls; freezing from the top surface in a cubic cavity immersed in hot environment; volumetric freezing in a cube filled with fluid. Optical methods: Particle Image Velocimetry and Thermometry were applied for the flow analysis. Computer supported experimentation combined with digital data recording and processing allowed for the acquisition of a large amount of details on temporary temperature and velocity fields, as well as on phase front position. This data are available on the website and in several publications to be used as experimental benchmarks which allow the validation of numerical models used in solidification problems. The data obtained were used to test reliability of typical casting codes (Vulcan, Procast), two general purpose CFD codes Fluent and Fidap, and available university codes. Investigations indicated large sensitivity of the simulation results on thermal boundary conditions. Severe discrepancies were observed for data obtained with the casting codes. The performance and accuracy of typical approximation schemes finite differences, finite volume and finite element method, were compared with a new mesh-free numerical approach, for a flow configuration typical for solidification problems. The finite volume method appeared favourable in accuracy whereas finite element in performance (speed). Performance and accuracy of the mesh-free approach was unsatisfactory. It indicates necessity for further development of its fundamental algorithms.

Lista ważniejszych oznaczeń:

α	(W m ⁻² K ⁻¹)	współczynnik przejmowania ciepła
β	(K ⁻¹)	współczynnik rozszerzalności cieplnej
λ	(kJ kg ⁻¹)	ciepło topnienia
μ	(kg/ms)	lepkość dynamiczna
ν	(m ² s ⁻¹)	lepkość kinematyczna
ρ	(kg m ⁻³)	gęstość substancji w stanie ciekłym
ρ_s	(kg m ⁻³)	gęstość substancji w stanie stałym
σ	(N m ⁻¹)	napięcie powierzchniowe
c_{pl}	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)	ciepło właściwe substancji w stanie ciekłym
c_{ps}	(J kg ⁻¹ K ⁻¹)	ciepło właściwe substancji w stanie stałym
f_g		udział objętościowy substancji w fazie gazowej
f_l		udział objętościowy substancji w fazie ciekłej
f_s		udział objętościowy substancji w fazie stałej
g	(m s ⁻²)	przyspieszenie ziemskie
h	(kJ kg ⁻¹)	entalpia
k	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	przewodność cieplna
k_l	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	przewodność cieplna substancji w stanie ciekłym
k_s	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	przewodność cieplna substancji w stanie stałym
p	(N m ⁻²)	ciśnienie
q	(m ³ s ⁻¹)	wydatek (warunki początkowe eksperymentu)
t	(s)	czas
u, v, w	(m s ⁻¹)	składowe prędkości
x, y, z	(m)	współrzędne układu kartezjańskiego
L	(m)	wymiar charakterystyczny, wewnętrzny wymiar naczynia
T_{ext}	(K)	temperatura zewnętrzna
T_s	(K)	temperatura solidus
T_l	(K)	temperatura liquidus
T_h	(K)	temperatura ścianki gorącej
T_c	(K)	temperatura ścianki zimnej
T_0	(K)	temperatura początkowa
U, V, W		bezwymiarowe składowe prędkości
X, Y, Z		bezwymiarowe współrzędne układu kartezjańskiego
Ra		liczba Rayleigha
Pr		liczba Prandtla
Ste		liczba Stefana
Nu		liczba Nusselta