

# Numeryczna analiza przepływów w wybranych fragmentach układów wlewowych stosowanych przy wytwarzaniu odlewów wielkogabarytowych

T. Goraj <sup>a\*</sup>, M. Szucki <sup>b</sup>, J. Lelito <sup>c</sup>, J. S. Suchy <sup>d</sup>  
<sup>a-d</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza. Wydział Odlewnictwa,  
ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska  
<sup>\*</sup>Kontakt korespondencyjny: e-mail: goraj.agh@gmail.com

Otrzymano 20.11.2014; zaakceptowano do druku 12.12.2014

## Streszczenie

Niniejsza praca zawiera analizę przepływów dwufazowych (ciekły metal - gaz) w wybranym fragmencie układów wlewowych, stosowanych przy produkcji wielkogabarytowych odlewów ze stopów żelaza, w oparciu o symulacje komputerowe wykonane w programie FLOW-3D. W ramach publikacji dobrano układy modelowe oraz parametry symulacji numerycznych. Na podstawie uzyskanych wyników badań szczegółowo przestudiowano rozkład prędkości i ciśnienia w tych układach oraz wskazano obszary narażone na erozję materiału ceramicznego i miejsca kumulowania się gazów.

**Słowa kluczowe:** analiza numeryczna, układy wlewowe, odlewy wielkogabarytowe, pęcherze gazowe, FLOW-3D

## 1. Wprowadzenie

Wykorzystanie komputerów do modelowania przepływu cieczy a w szczególności do zalewania formy odlewniczej ciekłym metalem oraz jego krzepnięcia wykonuje się z powodzeniem od roku 1960 [1]. Postęp technologiczny zarówno w sferze dostępnej mocy obliczeniowej jak i oprogramowania czyni programy symulacyjne dokładniejszymi, a odwzorowanie zjawisk występujących podczas produkcji odlewów (powstawanie naprężeń, prognozowanie mikrostruktury itp.) zgodne z rzeczywistością.

Znaczną część światowej produkcji odlewniczej stanowią odlewy wielkogabarytowe ze stopów żelaza. Elementy takie często nie mogą być wytworzone w inny sposób jak przez odlewanie. Spotyka się je w różnych gałęziach przemysłu, w tym w przemyśle

energetycznym, stoczniowym, chemicznym oraz metalurgicznym. Asortyment odlewów ciężkich stanowią głównie obudowy turbin parowych, korpusy obrabiarek, elementy układu napędowego okrętów oraz różnego rodzaju części maszyn i urządzeń.

Wytwarzanie odlewów wielkogabarytowych wiąże się z dużym nakładem pracy związanym głównie z przygotowaniem technologii odlewania. Obecnie odlewnie nie mogą sobie pozwolić na stosowanie drogich oraz czasochłonnych prób przemysłowych, dlatego większość z nich wykonuje, lub zleca wyspecjalizowanym firmom wykonanie symulacji komputerowych zalewania oraz krzepnięcia odlewu. Symulacje te mają za zadanie zaprojektowanie oraz optymalizację technologii produkcji. Opracowanie technologii ma głównie na celu dobranie właściwego kształtu i wymiarów gabarytowych układu wlewowego oraz zasilaczy (nadlewów). Układy wlewowe mają za zadanie doprowadzenie

ciepłego metalu do wnętrza formy oraz zapewnienie optymalnej prędkości zalewania (podnoszenia się lustra ciepłego metalu w formie). Przy produkcji odlewów wielkogabarytowych wykonuje się je przede wszystkim z gotowych prefabrykatów, kształtek ceramicznych lub papierowych [2]. Produkcją kształtek zajmują się wyspecjalizowane firmy, a asortyment oferowany przez poszczególnych producentów jest bardzo zbliżony i zawiera takie podstawowe elementy jak kolanka, trójniki, reduktory itp. [3].

## 2. Numeryczna analiza ruchu ciepłego metalu w kanałach układu wlewowego

### 2.1. Podstawy matematyczne procesu zalewania formy odlewniczej

Zgodnie z klasyfikacją stosowaną w obliczeniowej mechanice płynów (CFD) problem przepływu ciepłego metalu przez kanały układu wlewowego dzieli na dwa podstawowe etapy:

- etap pierwszy - proces wypełniania układu wlewowego przez płynącą cieć (przepływ dwufazowy cieć - gaz),
- etap drugi - układ wlewowy jest całkowicie wypełniony (przepływ jednofazowy).

Oba procesy mają istotny wpływ na końcową jakość odlewu. W niniejszej pracy skupiono się na etapie pierwszym, czyli przepływie dwufazowym, co oznacza, że analizuje się przypadek kiedy układ wlewowy jest w trakcie zapewniania ciepłym metalem. Przepływowi dwufazowemu w układach wlewowych, szczególnie tych stosowanych przy wytwarzaniu odlewów wielkogabarytowych, towarzyszą zjawiska takie jak erozja materiału, z którego wykonane są układy, pochłanianie gazów i zanieczyszczeń przez ciepły metal [4].

Przeważająca większość programów symulacyjnych do opisu transportu masy (ruchu cieczy) wykorzystuje równania Naviera-Stokes'a. Dla przepływów nieściśliwych równanie N-S przyjmuje postać [5, 6]:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}, \quad (1)$$

gdzie:

- $\mathbf{u}$  - prędkość płynu [m/s],
- $t$  - czas [s],
- $\rho$  - gęstość [kg/m<sup>3</sup>],
- $p$  - ciśnienie [Pa],
- $\nu$  - współczynnik lepkości kinematycznej [m<sup>2</sup>/s],
- $\mathbf{F}$  - jednostkowa siła masowa [m/s<sup>2</sup>],

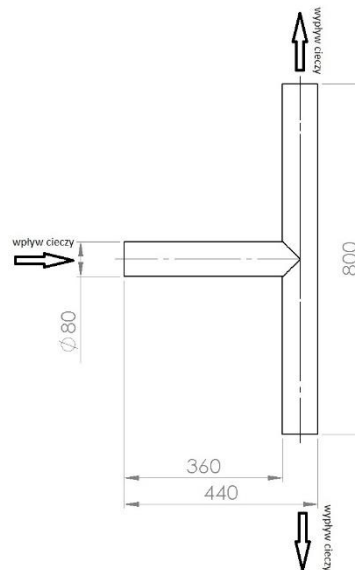
$$\nabla - \text{operator nabla } \nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right),$$

$$\nabla^2 - \text{operator Laplace'a (laplasjan)} \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Coraz częściej spotkać można również rozwiązania bazujące na równaniu Boltzmanna i tzw. metodzie LBM [7, 8].

### 2.2. Dobór układu modelowego

W celu wykonania analizy przepływów zaprojektowano układ modelowy (typ A) odwzorowujący fragment typowego układu wlewowego stosowanego przy produkcji stalowych i żeliwnych odlewów wielkogabarytowych. Ponieważ, jak wspomniano, do budowy takich układów stosuje się zazwyczaj gotowe prefabrykaty (takie jak kolanka, trójniki, rurki itp.), układ ten zbudowano w oparciu o geometrię kształtek ceramicznych dostępnych w ofercie firmy SEEIF Ceramic [3].



Rys. 1. Układ modelowy typu A wykorzystany w eksperymentach numerycznych

Rysunek 1 przedstawia układ modelowy typu A, który zbudowano poprzez połączenie trójnika i elementów prostoliniowych (rurek). Trójnik występuje powszechnie jako jeden z głównych elementów budulcowych ceramicznych układów wlewowych, gdyż odlewy wielkogabarytowe zasilane są zazwyczaj z kilku wlewów doprowadzających, co wymaga podzielenia strugi metalu.

### 2.3. Warunki brzegowe oraz parametry symulacji numerycznych

Analizy wykonano przy użyciu programu FLOW-3D, który jest narzędziem umożliwiającym symulację przepływów cieczy i procesu krystalizacji. Posiada on otwarty model matematyczny umożliwiający uwzględnienie szeregu procesów i zjawisk towarzyszących przepływowi występującym podczas zalewania formy [9]. Dzięki symulacjom można obserwować ruch ciepłego metalu wewnątrz kanałów układu wlewowego, co jest praktycznie niewykonalne przy zastosowaniu przemysłowych metod doświadczalnych. Na podstawie wyników próbnych symulacji zalewania odlewów wielkogabarytowych oraz konsultacji z technologami firmy ALSTOMPower (oddział w Elblągu) dobrano odpowiednie warunki brzegowo-początkowe dla symulacji numerycznych.

Analizę wykonano dla prędkości 1 m/s wpływu ciekłego metalu do badanego fragmentu układu wlewowego. Jednocześnie przyjęto, że ciecz może wypływać swobodnie z układu (ciśnienie w miejscu wypływu cieczy jest równe ciśnieniu atmosferycznemu). W analizie wykorzystano parametry fizyko-chemiczne staliwa o zawartości węgla 1 [% mas.] (baza danych FLOW-3D). Kierunek działania siły grawitacji - prostopadle do układu modelowego. Pominięto proces transportu energii (wymiany ciepła w układzie) oraz krystalizacji.

W tabeli 1 zestawiono parametry symulacji dla programu FLOW-3D.

Tabela 1. Parametry symulacji numerycznych

Lepkość dynamiczna	0.006 [Pa·s]
Gęstość cieczy	6980 [kg/m <sup>3</sup> ]
Prędkość na wejściu do badanego układu	1 [m/s]
Ciśnienie na wyjściu z układu	101325 [Pa]

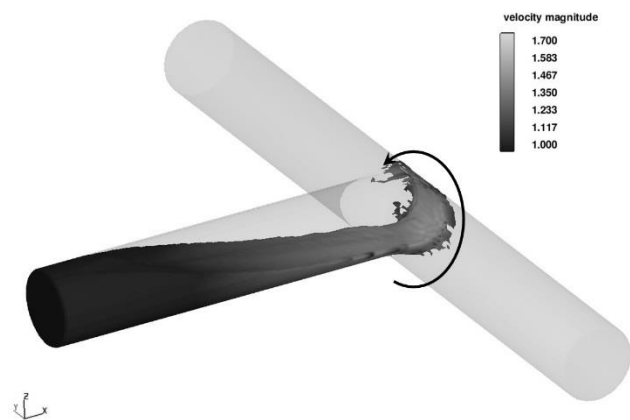
W celu lepszego przeanalizowania wpływu procesów towarzyszących przepływowi ciekłego metalu w układzie wlewowym na jakość odlewów podczas obliczeń numerycznych określano ilość powietrza porywanego przez płynącą strugę. Aby było to możliwe, aktywowano następujące moduły w programie FLOW-3D:

- *Air entrainment* (parameters: entrainment rate coefficient 0,5; surface tension coefficient 1,8;
- *Bubble and phase change* (adiabatic bubbles; gamma 1,4; pressure (pvoid) 1,013e+06).

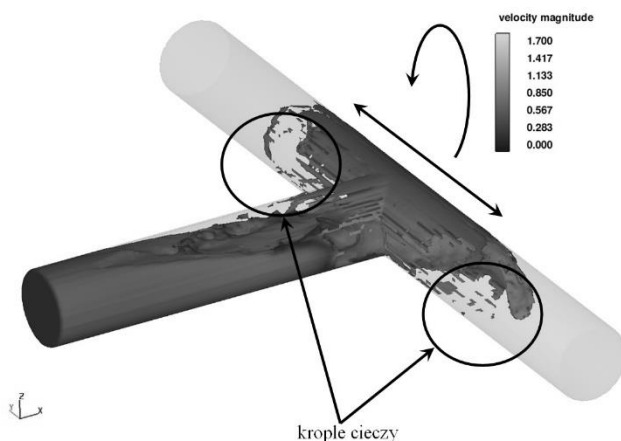
## 2.4. Zestawienie oraz analiza wyników

Wykonane w ramach niniejszej pracy symulacje miały na celu określenie prędkości przepływu, lokalnego kierunku ruchu, miejsc narażonych na powstawanie zawirowań ciekłego metalu, wyznaczenie rozkładu ciśnienia panującego w poszczególnych fragmentach badanych układów.

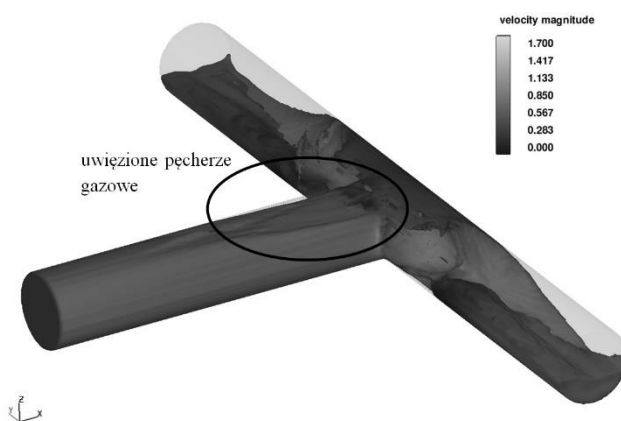
Wyniki zostały przedstawione w postaci rzutów trójwymiarowych (3D) i przekrojów dwuwymiarowych (2D).



Rys. 2. Profil prędkości po czasie 0,3 s



Rys. 3. Profil prędkości po czasie 0,5 s



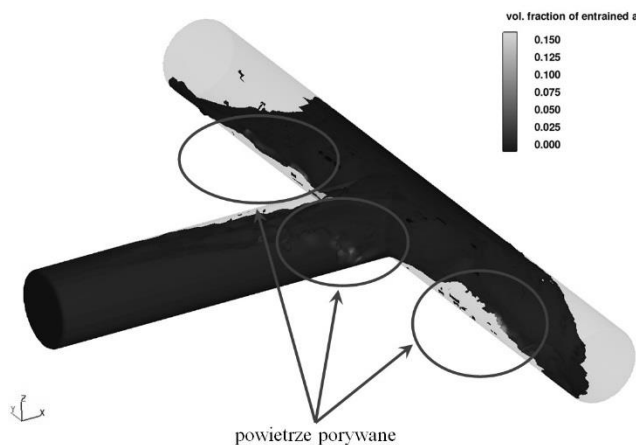
Rys. 4. Profil prędkości po czasie 1,35 s



Rys. 5. Uwięzione pęcherze gazowe po czasie 1,1 s

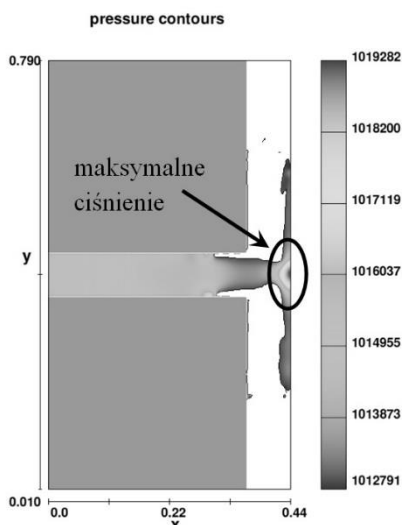
Na rysunku 2 przedstawiono profil prędkości w początkowym etapie (0,3 [s]) wypełniania układu modelowego. Zauważono

prawie dwukrotny lokalny wzrost prędkości przepływu oraz skłonność do ruchu strugi po okrągłym profilu układu. W kolejnym etapie (rys. 3) obserwowano odrywanie się krople ciekłego metalu od strugi oraz znaczący wzrost pola powierzchni granicy rozdzielającej fazę ciekłą i gazową (powierzchni swobodnej). Taki przebieg procesu zalewania może potęgować niekorzystne zjawisko utleniania powierzchni swobodnej. Rysunek 4 przedstawia profil prędkości po czasie 1,35 [s] licząc od chwili początkowej, gdzie obserwuje się zamykanie znacznych objętości gazu w strudze. Uwięzione pęcherze gazowe zostały zaznaczone na rysunku 5.

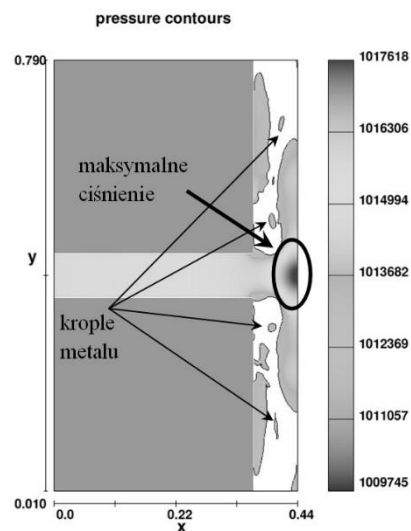


Rys. 6. Objętość powietrza porwanego przez strugę metalu po czasie 0,65 s

Na rysunku 6 przedstawiono rozmieszczenie obszarów, w których znajduje się największa objętość powietrza porwanego przez płynący ciekły metal. Gazy, które wraz z ciekłym stopem odlewniczym dostaną się do wnętrza formy mogą powodować trudne bądź niemożliwe do usunięcia wady odlewnicze.



Rys. 7. Profil ciśnienia po czasie 0,55 s

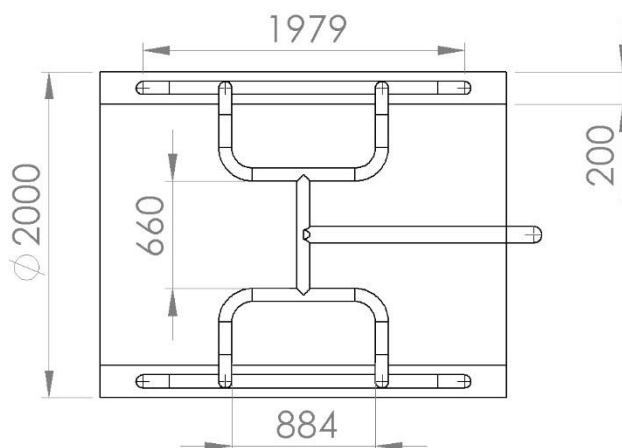


Rys. 8. Profil ciśnienia po czasie 2,65 s

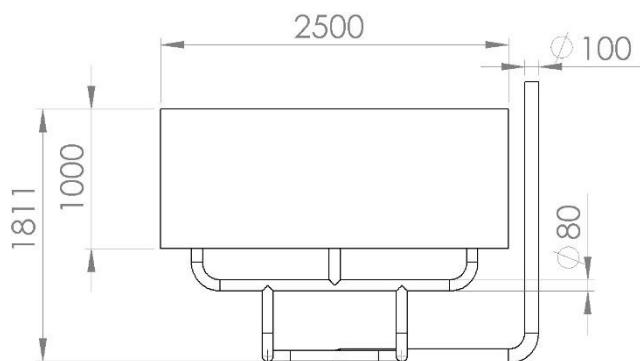
Dla lepszego zobrazowania profile ciśnienia (rys. 7 i 8) przedstawiono w formie dwuwymiarowego, poziomego przekroju przechodzącego przez środek układu. Najbardziej narażony na uszkodzenia rejon jest umiejscowiony prostopadłe do wlotu cieczy do układu. Płynąca struga napotyka ściankę prostopadłą do ruchu i następuje tam spiętrzenie ciśnienia, które w początkowym momencie zapełniania układu ma najwyższą wartość (rys. 7). Na rysunku 8 przedstawiono dalszy proces wypełniania układu, zaznaczono obszar podwyższonego ciśnienia oraz miejsca, gdzie zlokalizowano krople cieczy oderwane od strugi.

Aby zobrazować skalę problemu pochłaniania gazów podczas zalewania odlewu opracowano dodatkowy układ modelowy typu B (rys. 9a i b), odwzorowujący przykładowy układ wlewy wraz z odlewem.

Przeprowadzono symulację numeryczną w programie FLOW-3D przy użyciu parametrów i warunków brzegowych takich, jak w przypadku układu modelowego A (Tabela 1) przedstawionego na rysunku 1. Jediną zmianą było zastosowanie prędkości na wlocie do układu równej 5 [m/s].

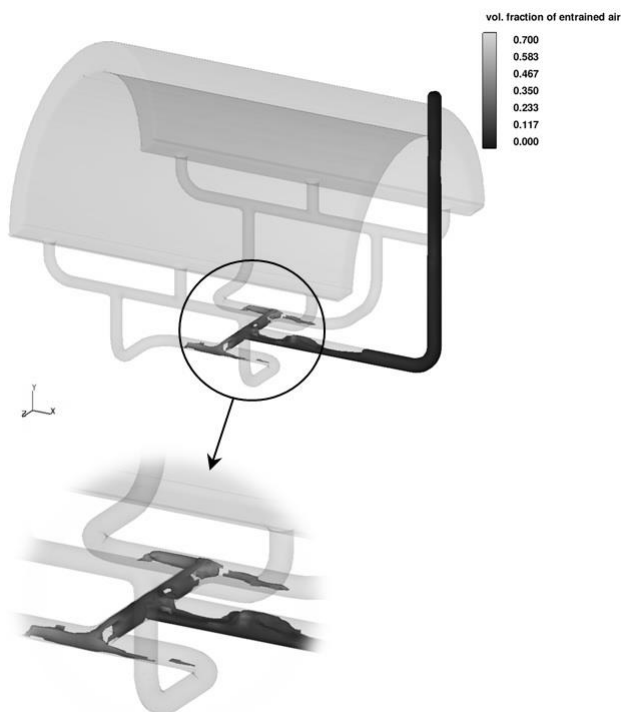


Rys. 9a. Układ modelowy typu B (rzut z dołu)



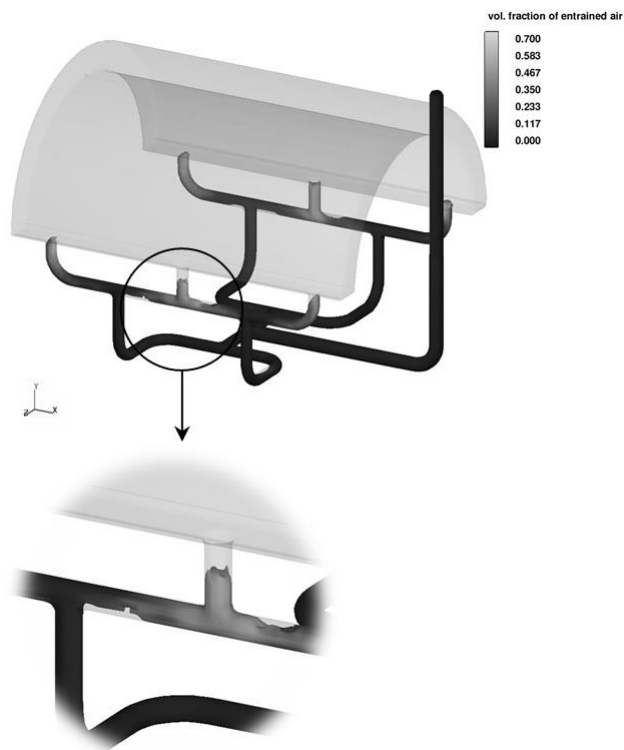
Rys. 9b. Układ modelowy typu B (rzut z boku)

Jak wspomniano typowy odlew wielkogabarytowy zasilany jest z kilku wlewów doprowadzających. Na rysunku 10 przedstawiono początkową fazę zapełniania układu wlewowego. Można zaobserwować dużą ilość powietrza, które zostało uwięzione w kanałach układu.



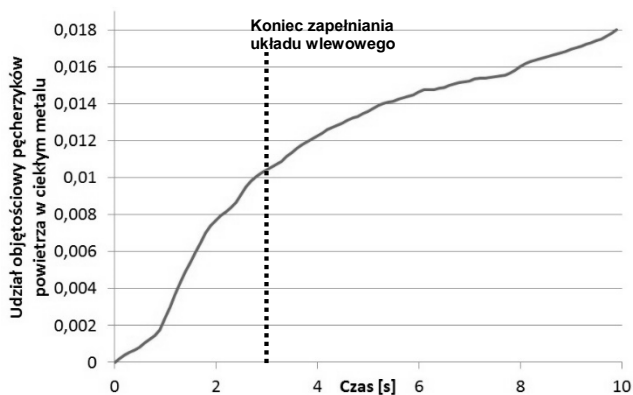
Rys. 10. Układ modelowy typu B - zalewanie - 0,7 s

Rysunek 11 prezentuje stan układu tuż przed jego całkowitym zapełnieniem. Skalą kolorów oznaczono objętościowy udział powietrza porywanego przez ciekły metal. Obszary półprzezroczyste świadczą o uwięzionym gazie wewnątrz strugi.



Rys. 11. Układ modelowy typu B - zalewanie - 2,11 s

Czas zapełniania układu wlewowego wyniósł około 3 [s]. Na podstawie rysunku 12 można więc zauważyć, że ponad 50 [%] objętościowego udziału pęcherzyków powietrza w ciekłym metalu powstaje podczas zapełniania kanałów układu wlewowego.



Rys. 12. Przyrost sumarycznego udziału objętościowego pęcherzyków powietrza zamkniętych w ciekłym metalu

## 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że zastosowanie trójnika w układzie wlewowym przyczynia się do powstania turbulencji w cieczy, co bezpośrednio wiąże się ze zjawiskiem pochłaniania dużych ilości gazów znajdujących się w układzie, a w konsekwencji z powstawaniem wad odlewniczych. Trójniki narażone są na erozję spowodowaną spiętrzeniem ciśnienia oraz znacznym wzrostem prędkości przepływu w ich obrębie. Powstawaniu turbulencji sprzyja również okrągły przekrój kanałów układu wlewowego.

Zastosowanie geometrii o przekroju kołowym dla układów wlewowych (wykonanych z gotowych elementów - kształtek) wydaje się być próbą bezpośredniego przeniesienia rozwiązań wykorzystywanych w instalacjach wodno - kanalizacyjnych na grunt odlewnictwa. Nie jest to słuszne rozwiązanie, gdyż warunki pracy układu wlewowego związane z wysoką temperaturą ciekłego metalu, obciążeniami dynamicznymi i statycznymi mogą powodować uszkodzenia układu.

Zdaniem autorów należy rozważyć zmianę geometrii układów wlewowych dla odlewów wielkogabarytowych.

## Podziękowania

Autorzy dziękują firmie ALSTOMPower za pomoc okazaną przy realizacji pracy.

Praca zrealizowana w ramach działalności statutowej 11.11.170.318 Zad. 1.

## Literatura

[1] L. L. Chen, R. X. Liu, H. T. Lin (1999). *Numerical simulation of casting process*, College of Materials Science and

Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan.

- [2] B. Grabowska, M. Szucki, J. S. Suchy, S. Eichhilz, K. Hodor (2013). *Thermal degradation behavior of cellulose-based material for gating system in iron casting production*, POLIMERY, 58, nr1.
- [3] SEEIF, Ceramic, a.s. (2007). Katalog Producenta, Czech Republic.
- [4] S. M. H. Mirbagheri, M. Dadashzadeh, S. Serajzadeh, A. K. Taheri, P. Davami (2004). *Modeling the effect of mould wall roughness on the melt flow simulation in casting process*, Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Teheran.
- [5] K. Jeżowiecka-Kabsch, H. Szewczyk (2001). *Mechanika płynów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [6] T. Kowalewski, A. Cybulski, T. Michałek, M. Kowalczyk (2005). *Laboratoryjne wzorce do walidacji programów odlewniczych*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa.
- [7] M. Szucki, J.S. Suchy, P. Żak, J. Lelito, B. Graczyk (2010). *Extended free surface flow model based on the lattice Boltzmann approach*, Metallurgy and Foundry Engineering.
- [8] I. Ginzburg, K. Steiner (2002). *Lattice Boltzmann Model for Free-surface flow and Its Application to Filling Process in Casting*, Berichte des Fraunhofer ITWM, Nr. 34.
- [9] M. Szucki, T. Goraj, J. Lelito, J.S. Suchy (2013). *Numerical Analysis of Solid Particles Flow in Liquid Metal*, Archives of Foundry Engineering, 31/3, 161-166.

# Numerical Analysis of Flows in Selected Parts of the Gating Systems Used in Large-size Castings Production

Current work includes an analysis of the two-phase flows (liquid metal - gas) in a selected parts of the gating systems, used in large-size iron castings production. The studies were carried out with the use of FLOW-3D software. Within the paper a model system and the parameters of numerical simulations were selected. Based on the obtained results, the velocity and pressure profile in the model systems were analyzed as well as the areas susceptible to erosion of the ceramic material and gas entrainment were indicated.