

SYMULACJA PRZEPIYU PLYNU W KADZI WIROWEJ O WIELOPUNKTOWYM NAPELNIANIU*

Monika Sterczyńska, Marek Jakubowski

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. Praca prezentuje porównanie wyników uzyskanych dla modelu symulacyjnego CFD (Computational Fluid Dynamics) kadzi wirowej o napełnianiu jednostronnym (klasycznym) i zwielokrotnionym po obwodzie. Przedmiotem analizy było określenie wpływu zastosowania napełniania z wykorzystaniem czterech otworów rozmieszczonych symetrycznie na płaszczyźnie płaszcza zbiornika kadzi wirowej na występowanie przepływ wtórnego odpowiedzialnego za formowanie się stożka osadu gorącego. Analiza czasów formowania oraz wartości prędkości maksymalnej przepływu wtórnego który jest odpowiedzialny za powstawania specyficznego kształtu stożka osadu wykazała zróżnicowanie wyników w zależności od wariantu napełniania. W odniesieniu do klasycznego napełniania korzystniejsze warunki (skrócenie czasu powstawania przepływu formującego stożek osadu oraz wyższą wartość prędkości) uzyskano przy napełnianiu wielostronnym.

Słowa kluczowe: kadź wirowa, modelowanie CFD, symulacja przepływu, przepływ wtórny

Wstęp

Kadź wirowa (nazywana w praktyce produkcyjnej whirlpooliem) jest aparatem wykorzystywanym w procesie produkcji brzezki piwnej do jej klarowania bezpośrednio po gotowaniu [BRIGGS i in. 2004]. Jest to rodzaj zbiornika sedymentacyjnego w kształcie cylindrycznym (rys. 1a) napełnianego poprzez otwór dolotowy umiejscowiony stycznie do płaszcza zbiornika prostopadle do jego średnicy. Dzięki takiemu umiejscowieniu uzyskuje się ruch wirowy brzezki [Bamforth 2003; Kunze 2010], który wspomaga sedymentację uformowanego tzw. osadu gorącego będącego produktem ubocznym gotowania brzezki z chmielem. Separacja następuje w sposób naturalny w wyniku czego powstaje silnie oddziaływujący przepływ wtórny w obszarze zbliżonym do dna zbiornika, w tzw. warstwie

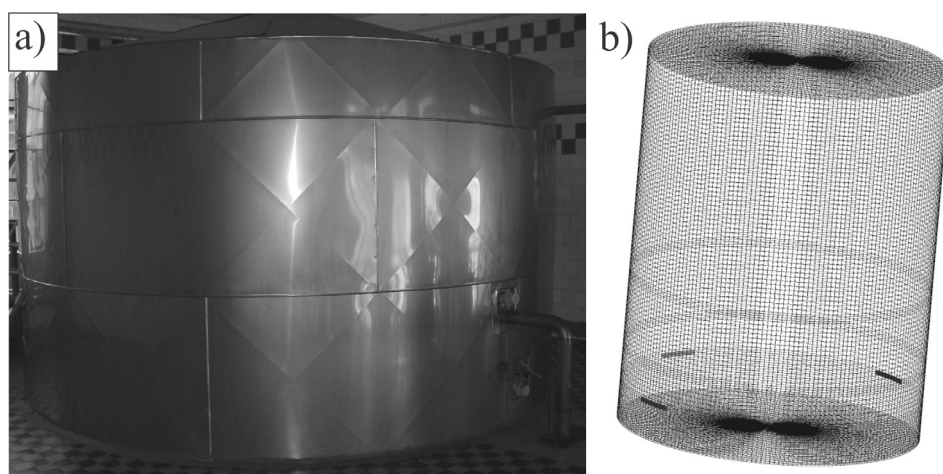
* Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy nr N N313 429639

granicznej Ekmana [Vanyo 2001]. Kierunek występowania przepływu namywającego ujawnia się zjawiskiem, którego efektem jest formowanie się opadającego osadu w postaci stożka, w centralnym obszarze dna zbiornika. Obserwacja tego specyficznego zjawiska została opisana po raz pierwszy przez Alberta Einsteina, który nazwał je „efektem filizanki herbaty” [Einstein 1926]. Opis ten jednak nie zawierał jasno określonej hipotezy dotyczącej takiego sposobu formowania się fusów herbacianych.

Celem artykułu jest prezentacja możliwości zastosowania opracowanego modelu CFD (Computational Fluid Dynamics) trójwymiarowego przepływu płynu w zbiorniku kadzi wirowej. Przedmiotem analizy jest porównanie zasilania jednopunktowego i zwielokrotnionego. Zaprezentowano analizę występowania układu przepływów wtórnych oddziałujących na zjawisko formowania się stożka osadu.

Model i narzędzie modelowania

Symulację przeprowadzono korzystając z oprogramowania ANSYS CFX 12.1, który jako narzędzie CFD bazuje na metodzie objętości skończonych FVM (Finite Volume Method) [ANSYS-CFX 2009]. Pozwala ona na uzyskanie, w przestrzeni dyskretnej, rozwiązania numerycznego układu równań bilansowych opisującego ruch płynu. Układ równań, w postaci różniczkowej, opisujących ruch płynu w zbiorniku kadzi wirowej został przedstawiony w publikacji Jakubowski, Diakun [2007].



Źródło: opracowanie własne

Rys. 1. Kadź wirowa: a) widok ogólny zbiornika przemysłowego, b) model geometryczny z naniesioną siatką dyskretyzacyjną

Fig. 1. Whirlpool: a) general view of an industrial tank, b) geometrical model with the finite elements grid

Opracowano model geometryczny zbiornika whirlpoola posiadającego cztery otwory wlotowe rozmieszczone symetrycznie po obwodzie płaszcza zbiornika na jednakowej wysokości. Przy pomocy oprogramowania ANSYS MECHANICAL APDL 12.1 przeprowadzono dyskretyzację przestrzeni modelu geometrycznego siatką strukturalną wykorzystując dostępny w bibliotece programu typ elementu siatki o nazwie Fluid 142 [Ansys-Apdl 2009]. Wygenerowano siatkę o ilości ok. 1 800 000 elementów (rys. 1b), która posiadała zagęszczenia elementów w pobliżu ściany i dna zbiornika, co związane było z charakterem zjawisk przepływowych występujących w pobliżu warstwy granicznej przy dnie i ścianie zbiornika kadzi wirowej. Jako warunek początkowy symulacji przyjęto maksymalną wartość prędkości napełniania wynoszącą $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Prędkość ta odpowiada możliwej do uzyskania średniej wartości prędkości napełniania laboratoryjnej kadzi wirowej [Jakubowski 2008]. Ze względu na charakter ruchu zagadnienie modelowano jako turbulентne na podstawie analiz kryterialnych zjawisk analogicznych występujących w przepływie zawirowanym [Grenspan 1990; Chils 2011].

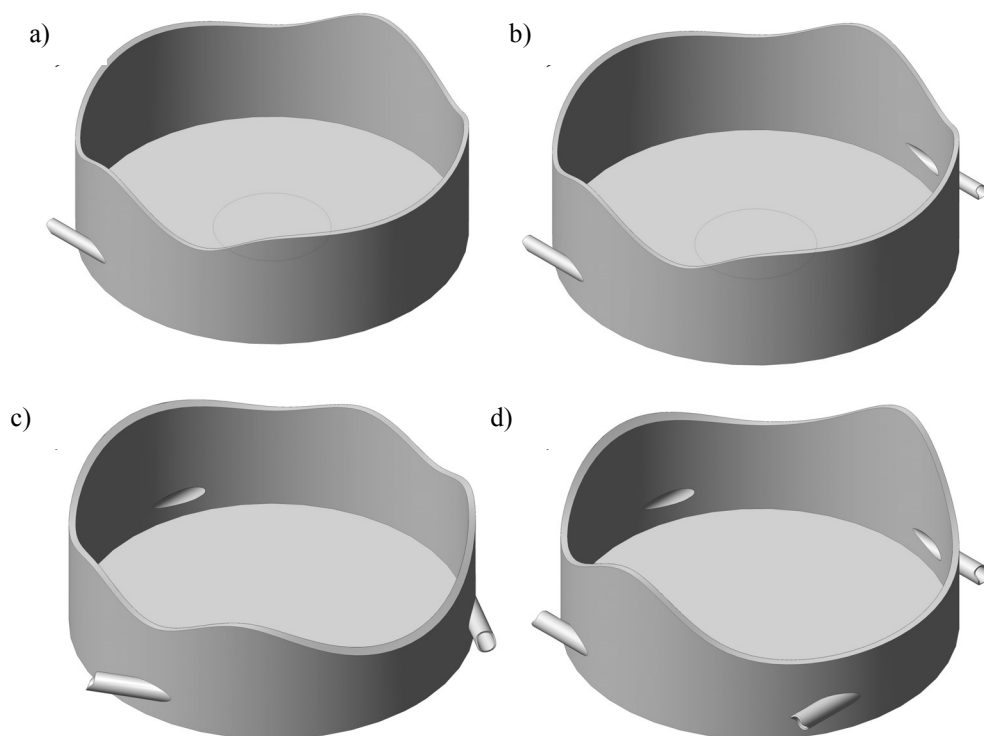
Wielopunktowe napełnianie zbiornika kadzi wirowej

Całkowite usunięcie osadu gorącego warunkuje możliwość dalszego przetwarzania brzezki piwnej. Aby bezproblemowo usunąć osad należy przede wszystkim dążyć do uzyskania w trakcie gotowania tzw. „przełomu”, czyli zawiesiny o dobrych właściwościach sedymentacyjnych, która dobrze wydzieli się z brzezki tworząc zwarte konglomeraty białkowe. W kadzi wirowej, na etapie postoju utworzą one „zbity” stożek osadu. Problem z usuwaniem osadu gorącego pojawia się, gdy osad niedostatecznie wydzieli się z brzezki. Stożek uformowany z takiego osadu ulega łatwo rozmyciu na etapie opróżniania zbiornika i osuszania stożka. Opisana sytuacja występuje dość często, a wynika z zastosowania dodatków niesłodowych, których dodatek ma na celu obniżenie kosztów produkcji. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest wcześniejsze zakończenie opróżniania kadzi i pozostawienie pewnej ilości brzezki, aby uniknąć pobrania osadu wraz ze sklarowaną brzezka. Biorąc powyższe pod uwagę należy zatem dążyć do stworzenia jak najkorzystniejszych warunków sedymentacji w kadzi wirowej.

Wcześniejsze własne analizy numeryczne i badania eksperymentalne dotyczące przepływów występujących w kadzi wirowej ujawniły, iż powstający podczas napełniania zbiornika przepływ pierwotny (będący konsekwencją specyficznego sposobu napełniania) dąży do swoistej symetryzacji. Początkowa faza występowania przepływu namywającego (objawiająca się formowaniem stożka osadu w kształt zbliżony do torusa) przypada na czas właściwy dla symetryzowania się przepływu pierwotnego. Zjawisko to występuje pod koniec etapu napełniania kadzi wirowej. Powstała więc koncepcja jego symetryzacji już na etapie napełniania. Zaproponowano wprowadzenie modyfikacji konstrukcji zasilania kadzi oraz sposobu jej napełniania zapewniającego symetryczny napływ brzezki do aparatu. Istotą tego rozwiązania jest założenie, iż wprowadzenie brzezki do wnętrza zbiornika kadzi wirowej realizowane będzie z wykorzystaniem kilku symetrycznie rozmieszczonych

otworów wlotowych, które umiejscowione będą w jednakowych odległościach na obwodzie ściany zbiornika. Rozwiązanie takie zapewni równoważące wielopunktowe napełnianie kadzi wirowej, prowadzące do symetryzacji przepływu w zbiorniku już na etapie napełniania. Na rys. 2 przedstawiono warianty rozmieszczenia otworów wlotowych – dwustronny (rys. 2b), trójstronny (rys. 2c) oraz czterostronny (rys. 2d) [Jakubowski 2009].

W dalszej części prezentowanej pracy porównano modele z napełnianiem jednostronnym (najprostszym – przedstawionym na rys. 2a) i czterostronnym (najbardziej skomplikowanym) przedstawionym na rys. 2d. Wyniki uzyskane dla modelu o podwojonym zasilaniu przedstawiono we wcześniejszych publikacjach autora, np. w pracy Jakubowskiego [2011].



Źródło: Polczyński 2010

Rys. 2. Porównanie rozwiązań zasilania kadzi wirowej: a) w konstrukcji klasycznej (z pojedynczym wlotem); b) z podwojonym wlotem; c) z potrójnym wlotem; d) z czterostronnie umiejscowionym wlotem

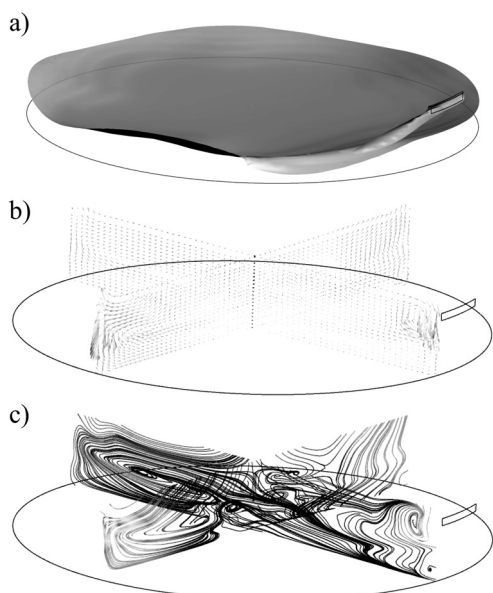
Fig. 2. Comparison of Whirlpool inflows solutions: a) in the classical construction (with a single inlet); b) with a doubled inlet, c) with a tripled inlet; d) with a four-sided inlet

Wyniki i dyskusja

W wyniku zrealizowanego cyklu obliczeń symulacyjnych otrzymano pliki wynikowe dla każdego kroku czasowego zadeklarowanego jako sekunda napełniania i wirowania. Na bazie istniejącej geometrii zbiornika wygenerowano izopowierzchnię udziału frakcji VOF (volume of fluid) na poziomie testowym wynoszącym 0,5 dla zobrazowania kształtu zwierciadła swobodnego wirującej cieczy. Wykonano także robocze płaszczyzny przekroju w osi symetrii zbiornika dla przestrzeni zbliżonych do otworu wlotowego (lub otworów w przypadku napełniania wielostronnego) dna zbiornika, a także połączenia dna i płaszcza zbiornika. Na płaszczyznach roboczych wygenerowano wektorowe mapy rozkładu prędkości cieczy wirującej w zbiorniku Whirlpoola. W celu lepszego zobrazowania zawirowań wykonano wizualizację linii prądu (streamlines) dla przepływu wtórnego na płaszczyznach roboczych. Stanowią one zbiór krzywych torów ruchu elementów płynu przemieszczających się w czasie do dowolnego miejsca w przestrzeni przepływu. Z uwagi na znaczną ilość materiału wynikowego analizę ograniczono do wybranych kroków czasowych.

Na rys. 3a i 4a przedstawiono izopowierzchnie odwzorowania kształtu swobodnej powierzchni dla przykładowych, początkowych czasów napełniania zbiornika dla wariantu zasilania napełniania jednostronnego i czterostronnego. Ukształtowanie zwierciadła powierzchni swobodnej wirującego płynu jest jedną z podstawowych informacji o poprawności zbudowanego i analizowanego modelu symulacyjnego. Kształt granicy fazy ciekłej i gazowej jest stosunkowo łatwy do zweryfikowania eksperymentalnego poprzez porównanie kształtu uzyskanego na drodze symulacji i napełniania zbiornika w warunkach rzeczywistych. Dodatkowo istnieje możliwość obliczenia objętości bryły ograniczonej ścianą i dnem zbiornika, a od góry swobodną powierzchnią i na tej podstawie testowanie poprawności wyników symulacji na podstawie porównania czasu napełniania w modelu numerycznym i obiekcie rzeczywistym.

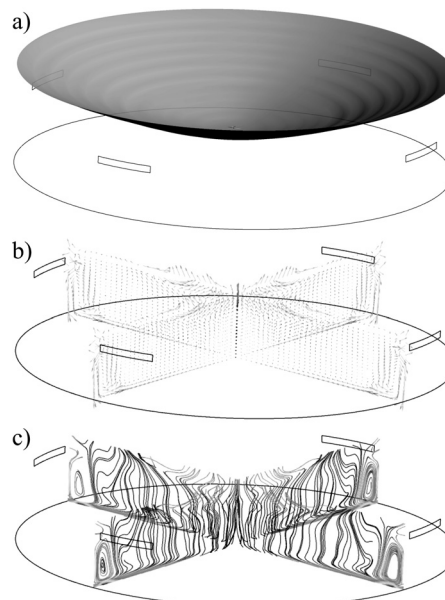
W przypadku prawidłowej realizacji operacji usuwania osadu gorącego najważniejszym zagadnieniem wydaje się być powstawanie i pełne uformowanie wtórnego przepływu odpowiedzialnego za formowanie się osadu w postaci stożka. Jest to przepływ lokalny, który występuje w ograniczonej przestrzeni przy dnie zbiornika w sposób ciągły praktycznie do całkowitego zatrzymania wirującego płynu. Na rysunku 3b i 4b przedstawiono przykładowe mapy pola prędkości dla wydzielonych obszarów przekrojów osiowych walca umiejscowionych przy dnie zbiornika. Wyniki analizy symulacyjnej wykazują, iż przepływ wtórny namywający nie występuje na etapie napełniania zbiornika w sposób jednostronny (rys. 3b). Z kolei analiza map pola prędkości na przekrojach dla wariantu napełniania czterostronnego (rys. 4b) ujawnia występowanie przepływu namywającego już na etapie napełniania, co pokrywa się z przeprowadzonymi obserwacjami eksperymentalnymi samego zjawiska.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 3. Wyniki symulacji dla modelu kadzi wirowej napełnianej jednostronnie (etap napełniania $t = 10$ s): a) kształt swobodnej powierzchni wirującej cieczy; b) wektorowe mapy pola prędkości przepływu wtórnego; c) linie prądu przepływu wtórnego

Fig. 3. Simulation results for the whirlpool model with one-sided filling (filling phase $t = 10$ s): a) the shape of the free surface of rotating liquid, b) vector maps of the velocity field for the secondary flow, c) the secondary flow streamlines



Źródło: opracowanie własne

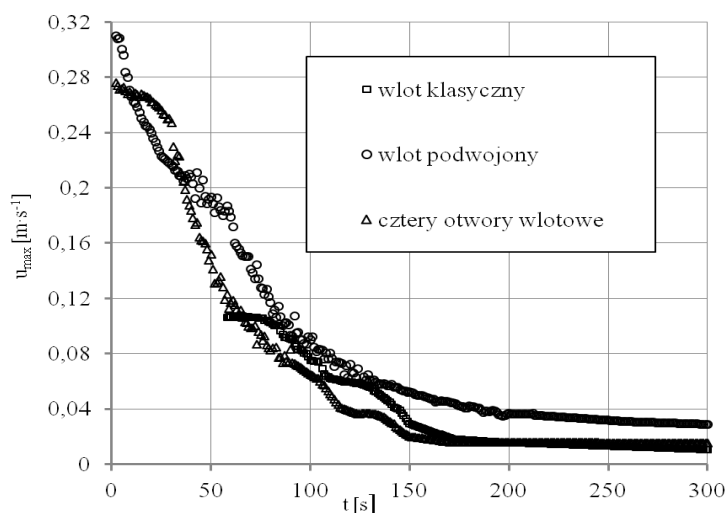
Rys. 4. Wyniki symulacji dla modelu kadzi wirowej napełnianej czterostronnie (etap napełniania $t = 20$ s): a) kształt swobodnej powierzchni wirującej cieczy; b) wektorowe mapy pola prędkości przepływu wtórnego; c) linie prądu przepływu wtórnego

Fig. 4. Simulation results for the whirlpool model with four-sided filling (filling phase $t = 20$ s): a) the shape of the free surface of rotating liquid, b) vector maps of the velocity field for the secondary flow, c) the secondary flow streamlines

Kolejnym elementem prezentowanej analizy wyników symulacji jest występowanie struktur wirowych przepływu wtórnego. Na rysunku 3c i 4c przedstawiono wizualizacje linii prądu przepływu (streamlines) dla wydzielonych przekrojów opisanych powyżej. Tego typu sposób prezentacji przepływu pozwala wskazać obszary w których występują struktury wirowe obrazowane charakterystycznymi liniami kołowymi lub eliptycznymi. Już po bieżącej analizie pozwala wskazać, iż w przypadku zasilania jednostronnego (rys. 3c) nie występują (na etapie napełniania) linie wskazujące na występowanie zawirowania odpowiedzialnego za formowanie stożka osadu. Uwydatnia się jedynie zawirowanie powstające za otworem zasilającym, które jednak jest wyłącznie konsekwencją styicznego napełniania

zbiornika i zanika po zakończeniu etapu napełniania whirlpoola. W przypadku linii prądu dla wariantu zasilania czterostronnego (rys. 4c) widoczne są eliptyczne linie charakterystyczne dla powstałych struktur wirowych występujących w pobliżu miejsca połączenia dna i płaszcza zbiornika. Tak jak w przypadku analizy pola prędkości przepływ namywający występuje na etapie napełniania zbiornika.

Ostatnim elementem analizy wyników symulacji było zbiorcze przedstawienie maksymalnej wartości prędkości przepływu wtórnego odpowiedzialnego z formowanie się stożka osadu. W tym celu z plików wynikowych pobrano maksymalne wartości prędkości przepływu wtórnego (u_{\max}) prezentowanego powyżej. Na rysunku 5 przedstawiono wykres zmian (w czasie) wartości u_{\max} dla wariantu zasilania klasycznego i czterostronnego, a także (dla porównania) dla wariantu symetrycznego, podwojonego po obwodzie zasilania.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 5. Wykres wartości prędkości u_{\max} przepływu formującego stożek osadu dla modelu zasilanego jednostronnie i czterostronnie (porównawczo zaprezentowano także wyniki dla modelu napełnianego przez dwa otwory wlotowe)

Fig. 5. Diagram of values of velocity u_{\max} for sediment cone formation flow in the one-side and four-sides supplied model and (results for the model filled by two inlets were presented for comparison purposes)

Analiza czasów powstawania i zmian wartości prędkości maksymalnej przepływu namywającego ujawnia znaczne zróżnicowanie wariantu napełniania jednostronnego i wielokrotnionego. Dla wariantu wielokrotnionego widoczne jest znaczne skrócenie czasu powstawania przepływu namywającego (w przypadku wariantów wielokrotnienia ilości otworów zasilających) oraz wyższe prędkości przepływu namywającego wynoszące dla zasilania dwustronnego $0,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i nieznacznie mniejszą wartość dla wariantu zasilania czterostronnego wynoszącą $0,276 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Dla wariantu napełniania jednostronnego uzyskano wartość u_{\max} wynoszącą $0,106 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Wnioski

1. Wyniki uzyskane dla opracowanego i poddanego analizie modelu CFD (w przypadku zasilania jednostronnego) potwierdzają obserwowane w eksperymencie występowanie straty energii wirowania związanej z symetryzacją przepływu pierwotnego. Część energii wirowania zostaje pochłonięta na symetryzowanie się przepływu pierwotnego, a przepływ wtórny odpowiedzialny za formowanie się stożka osadu powstaje dopiero po czasie „ustabilizowania się” przepływu wirującego płynu.
2. Wariant napełniania z wykorzystaniem pojedynczego otworu (napełnianie jednostronne) okazał się najmniej korzystny, gdyż uzyskano dla niego wartość u_{\max} wynoszącą $0,106 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ po upływie 60 sekund od rozpoczęcia etapu napełniania zbiornika.
3. Najkorzystniejsze warunki, a więc skrócenie czasu powstawania przepływu formującego stożek osadu i najwyższą wartość prędkości u_{\max} wynoszącą $0,31 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ uzyskaną po zaledwie 3 sekundach od rozpoczęcia etapu napełniania zbiornika uzyskano dla wariantu napełniania dwoma symetrycznie rozmieszczonymi otworami wlotowymi.
4. Nieco mniej korzystnie prezentują się wyniki symulacji dla wariantu napełniania czterostronnego, dla którego uzyskano wartość u_{\max} wynoszącą $0,276 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ po identycznym czasie jak w przypadku napełniania dwustronnego.
5. Napełnianie czterostronne, choć bardziej skomplikowane do realizacji w porównaniu do podwojonego jest jednak interesujące ze względu na występowanie wyższych wartości u_{\max} w początkowym czasie formowania się przepływu co może nie pozostawać bez wpływu na korzystniejsze warunki namywania cząstek osadu i pełniejsze grupowanie cząstek osadu w przejściowym etapie, w którym osad przyjmuje kształt torusa.

Bibliografia

- Bamforth C.** (2003): Beer: Tap Into the Art and Science of Brewing (SE). Oxford University Press, 139-140.
- Briggs D.E., Boulton C.A., Brookes P.A., Stevens R.** (2004): Brewing Science and Practice. Woodhead Publishing Ltd. CRS Press, 353.
- Chils P.R.N.** (2011): Rotating Flow. Elsevier. 102-106.
- Einstein A.** (1926): Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baer'schen Gesetzes. Naturwissenschaft, 14(2), 223-224.
- Grennspar H.P.** (1990): Theory of Rotating Fluids. Breuklen Press (reprint), 30-34.
- Jakubowski M.** (2008): Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na proces zawirowań powstających w kadzi wirowo-osadowej podczas klarowania zawiesin. Praca doktorska. Politechnika Koszalińska, 59-67.
- Jakubowski M.** (2009): Kadź wirowa, wykorzystywana zwłaszcza w browarnictwie oraz sposób jej napełniania - zgłoszenie patentowe nr P388831.
- Jakubowski M.** (2011): Model symulacyjny przepływu w kadzi wirowej o zwielokrotnionym zasilaniu. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego, 2, 58-61.
- Kunze W.** (2010): Technology Brewing and Malting, VLB Berlin, 388-391.
- Polczyński P.** (2010): Projekt laboratoryjnej kadzi wirowej o zmiennym układzie dysz zasilających. Praca dyplomowa inżynierska, Politechnika Koszalińska. Maszynopis.
- Vanyo J. P.** (2001): Rotating Fluids in Engineering and Science, Dover Publications (reprint), 188-191.
- Ansys-Apdl 12.1. (2009): Theory Reference. Pliki elektroniczne dokumentacji program.
- Ansys-Cfx 12.1. (2009): Pliki elektroniczne dokumentacji program.

FLUID FLOW SIMULATION IN A WHIRLPOOL TANK OF MULTIPOINT INFLOW

Abstract: The paper presents the comparison of simulation results obtained for the Computational Fluid Dynamics (CFD) model of the whirlpool tank of one-sided inflow (classic) and multiplied by the circumference. The subject of the analysis was to determine the effect of using four inlets placed symmetrically on a whirlpool plane of the tank on the occurrence of the secondary flow which is responsible for the formation of the hot trub cone. Analysis of the formation time and the speed of the secondary flow which is responsible for the formation of the specific shape of the cone of sediment results showed differences depending on the variant of the filling. With respect to the classical filling better conditions (shorter cone formation forming sediment flow and higher speed) achieved during the filling multilateral.

Key words: Whirlpool separator, CFD modeling, fluid flow simulation, secondary flow

Adres do korespondencji:

Marek Jakubowski; e-mail: marek.jakubowski@tu.koszalin.pl
Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego
Politechnika Koszalińska
ul. Raclawicka 15-17
75-620 Koszalin