

Dr inż. Marek Jakubowski
Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego
Politechnika Koszalińska

ANALIZA SYMULACYJNA WYSTĘPOWANIA PRZEPŁYWU NAMYWAJĄCEGO W GEOMETRYCZNIE SPECYFICZNYCH KONSTRUKCJACH KADZI WIROWEJ®

Zaprezentowana w artykule praca badawcza przedstawia symulacyjną analizę występowania przepływu wtórnego namywającego osad w kadzi wirowej. Przedmiotem analizy był przepływ w zbiornikach kadzi wirowej o kształtach występujących w konstrukcjach przemysłowych. Celem analizy było określenie wpływu zmiennych rozwiązań konstrukcyjnych kształtu takich zbiorników na warunki formowania i ewolucję przepływu wtórnego formującego stożek osadu.

Słowa kluczowe: symulacja, kadź wirowa, przepływ wtórny, konstrukcja przemysłowa.

WPROWADZENIE

Kadź wirowa jest aparatem powszechnie stosowanym w browarnictwie do oddzielania osadu gorącego w procesie klarowania brzezki piwnej po jej gotowaniu. Wykorzystywany jest w niej efekt koncentracji sedymentującego osadu w postaci stożka w centralnej strefie dennicy kadzi [2]. Zjawisko to zostało nazwane przez Alberta Einsteina „efektem filiżanki herbaty” [5]. Ta specyficzna forma geometryczna koncentracji osadu jest konsekwencją ruchu wirowego brzezki uzyskiwanego poprzez napełnianie zbiornika po stycznej. Klasyczna konstrukcja kadzi wirowej (rys. 1), to cylindryczny zbiornik z płaskim dnem pozbawiony wewnętrznej zabudowy, która zakłócałaby wirowanie brzezki. Modyfikacje tej konstrukcji wynikają z ciągłych poszukiwań nowych rozwiązań w zakresie poprawy uwarunkowań tworzenia się stożka osadu o zwartej konsystencji zebranego w centralnej strefie dna zbiornika.



Rys. 1. Widok ogólny klasycznej konstrukcji kadzi wirowej [3].

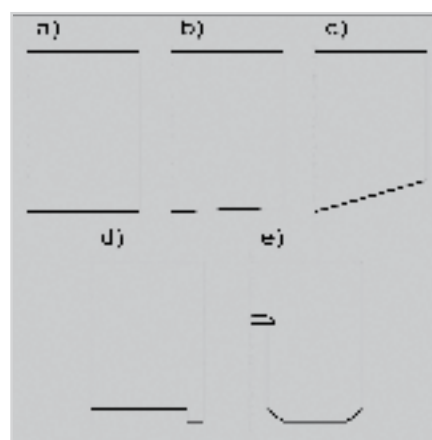
Celem artykułu jest prezentacja analizy (na podstawie obliczeń symulacyjnych), zmian prędkości przepływu namywającego stożek osadu w kadzi wirowej brzezki piwnej. Przedmiot analiz stanowiły rozwiązania geometrii zbiorników, występujące w wybranych konstrukcjach prze-

mysłowych kadzi wirowych. Wyniki porównano z danymi uzyskanymi dla przepływu występującego w cylindrycznym zbiorniku kadzi wirowej, który określono, jako tzw. kształt podstawowy.

PRZEDMIOT I NARZĘDZIE ANALIZY

W ramach analizy wykonano obliczenia dla modeli zbiorników kadzi wirowej:

- o płaskim kształcie dna (kształcie podstawowym - rys. 2a);
- o stożkowym dnie i kącie pochylenia 3° i 20° (rys. 2b i 2c);
- posiadającego tzw. półkę osadową i kanał spustu brzezki (rys. 2d);
- wyposażonego w przewód zasilający parasol dyfuzyjny brzezki (rys. 2e).



Rys. 2. Analizowane kształty zbiornika kadzi wirowej: a) o płaskiej dennicy (kształt podstawowy), b) o dennicy stożkowej i kącie pochylenia 3° , c) o dennicy stożkowej i kącie pochylenia 20° , d) o dennicy z półką osadową i kanałem odprowadzającym, e) o dennicy wyposażonej w przewód zasilający parasol dyfuzyjny brzezki.

Kształty stożkowe dna występują w rozwiązaniach konstrukcyjnych projektowanych przez producentów wyposażenia dla warzelnii minibrowarów, a także w rozwiązaniach adaptacyjnych (głównie zbiorników magazynowych) z przeznaczeniem na kadzie wirowe. Konstrukcja posiadająca półkę osadową i kanał spustu brzezki jest charakter-

styczna dla konstrukcji własnej zaprojektowanej przez zespół Katedry Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego Politechniki Koszalińskiej dla browaru Brok w Słupsku. Występuje ona także w starszych rozwiązaniach wykonywanych przez Steinecker GmbH. Ostatni wariant wyposażony w przewód zasilający parasol dyfuzyjny brzeczeki jest charakterystyczny dla kadzio-kotłów. Takie rozwiązanie występuje między innymi w konstrukcji Ziemiańska zainstalowanej w browarze Brok Koszalin [6].

Narzędziem symulacyjnym był pakiet ANSYS FLOTRAN, który pozwala na uzyskanie rozwiązania numerycznego układu równań opisującego ruch płynu. Przepływ modelowano jako płaski (pseudo 3D) osiowo-symetryczny z wirowaniem (przepływ swirl). Ze względu na charakter ruchu rozpatrywano przepływ jako turbulentny stosując model turbulencji GIR (nieliniowy Model of Girimaji). Jest to rozwinięcie modelu rekomendowane dla analiz zagadnień wirowych z występującymi przepływami o charakterze wtórnym [1]. Wygenerowano pięć modeli geometrycznych, a następnie przeprowadzono ich dyskretyzację przy pomocy elementu o nazwie Fluid 141, w wyniku czego otrzymano siatkę strukturalną o ilości elementów od 4500 do 6350. Na podstawie wcześniejszych analiz oraz badań eksperymentalnych ustalono przedział czasowy symulacji od 0 do 200 s wirowania, a maksymalną ilość iteracji kroku czasowego na 2000. Modele obliczeniowe posiadały wymiary odpowiadające zbiornikowi laboratoryjnej kadzi wirowej o wymiarach średnicy (D) = 640 mm i nominalnej wysokości napełnienia $H = 640$ mm. (smukłość napełnienia H/D dla wszystkich modeli wynosiła 1). Warunki symulacji dotyczyły wyłącznie hydrodynamicznego aspektu wirowania brzeczeki, a więc nie uwzględniano w przepływie występowania samego osadu oraz wzajemnego oddziaływania cząstek sedymentujących.

Przeprowadzono obliczenia symulacyjne i uzyskano wyniki w postaci danych wartości nodalnych i elementarnych, na podstawie których zidentyfikowano obszar występowania przepływu namywającego oraz rozkład jego prędkości maksymalnej. Uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi dla modelu podstawowego.

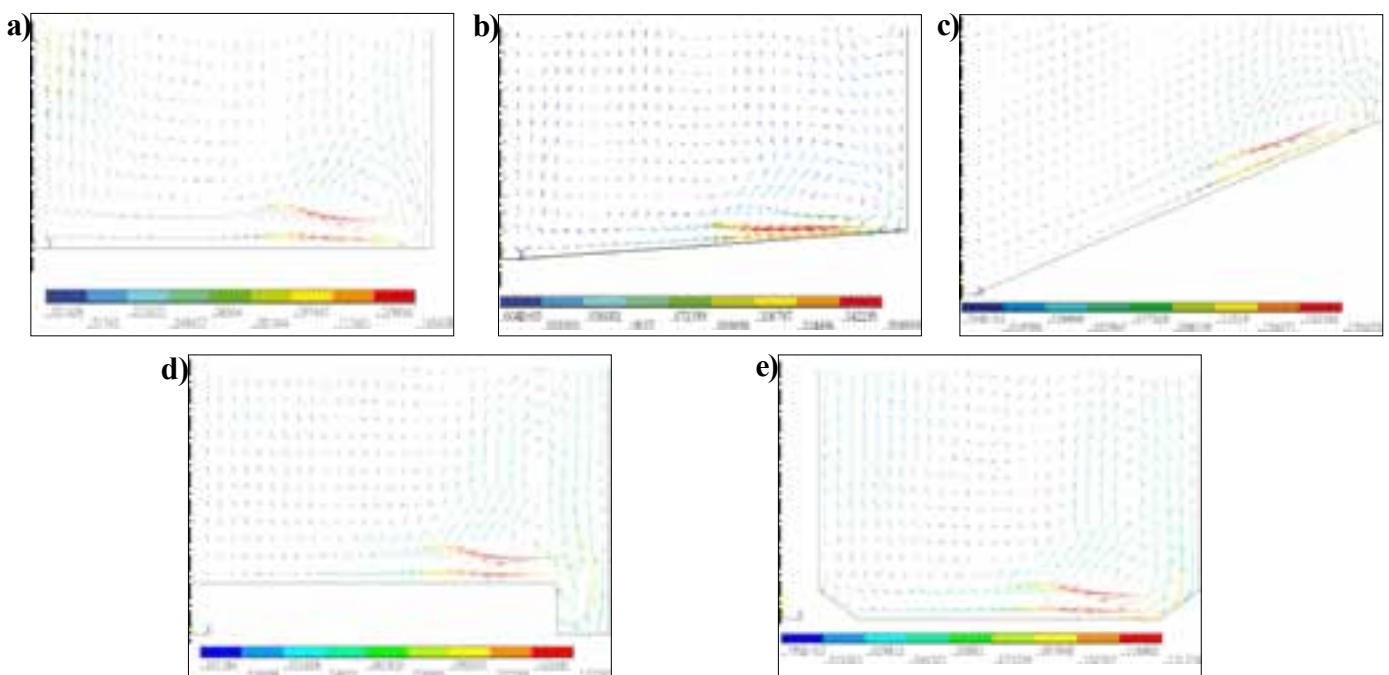
WYSTĘPOWANIE PRZEPŁYWU NAMYWAJĄCEGO

Na rysunku 3 przedstawiono uformowany przepływ namywający dla kroku czasowego, w którym posiadał on najwyższą wartość prędkości. Przepływ ten powstaje po ustabilizowaniu (symetryzacji) przepływu głównego. Jego początkowe zaburzenia są konsekwencją sposobu zasilania. Przepływ namywający tworzy się w pobliżu dna zbiornika, w tzw. warstwie Ekmana [4] i jest skierowany od połączenia pobocznicy i dna zbiornika do centralnej strefy zbiornika.

W modelu podstawowym przepływ namywający (rys. 3a) formuje się w $2/3$ promienia zbiornika. Początkowo jego kształt przekroju jest płaski, elipsoidalny. W miarę upływu czasu wirowania kształt przekroju tego przepływu wypełnia się przyjmując postać zbliżoną do kołowego. Pierwsze symptomy występowania tego przepływu pojawiają się po ustabilizowaniu (symetryzacji) przepływu pierwotnego.

W modelach o stożkowym dnie przepływ namywający (rys. 3b i rys. 3c) formuje się przy dnie w obszarze zbliżonym do obszaru formowania w modelu podstawowym. W odróżnieniu od niego, dla stożkowego kształtu dna występuje charakterystyczne wydłużenie obszaru oddziaływania przepływu namywającego, który jest orientowany skośną płaszczyzną dennicy zbiornika. Przepływ ten nie zmienia swojego położenia wypełniając się w miarę upływu czasu wirowania.

Przepływ namywający w modelu posiadającym półkę osadową i kanał spustowy (rys. 3d) formuje się na półce (poza kanałem). Widoczne jest jego przesunięcie w kierunku osi zbiornika. W samym kanale występuje zawirowanie, które może wygarniać gromadzący się tam osad, przy czym niskie wartości prędkości, mogą być niewystarczające dla skutecznego oddziaływania na osad. Kanał spustowy powoduje także powstawanie dodatkowych zaburzeń przepływu w obszarze zbliżonym do strefy występowania przepływu namywającego.



Rys. 3. Wektorowe mapy pola prędkości przepływu namywającego w modelach: a) o kształcie podstawowym, b) o stożkowej dennicy (3°), c) o stożkowej dennicy (20°), d) o dennicy wyposażonej w półkę osadową, e) o konstrukcji z parasolem dyfuzyjnym.

W modelu wyposażonym w parasol dyfuzyjny (Rrys. 3e) przepływ namywający formuje się bliżej osi zbiornika niż w modelu podstawowym, co jest spowodowane oddziaływaniem występującego w tym typie konstrukcji sfazowanego połączenia pobocznic i dennicy zbiornika. W czasie wirowania nie zmienia on swojego położenia. W miarę upływu czasu wirowania wypełnia się przyjmując kształt przekroju zbliżony do kołowego.

KINETYKA PRZEPIYU NAMYWAJĄCEGO

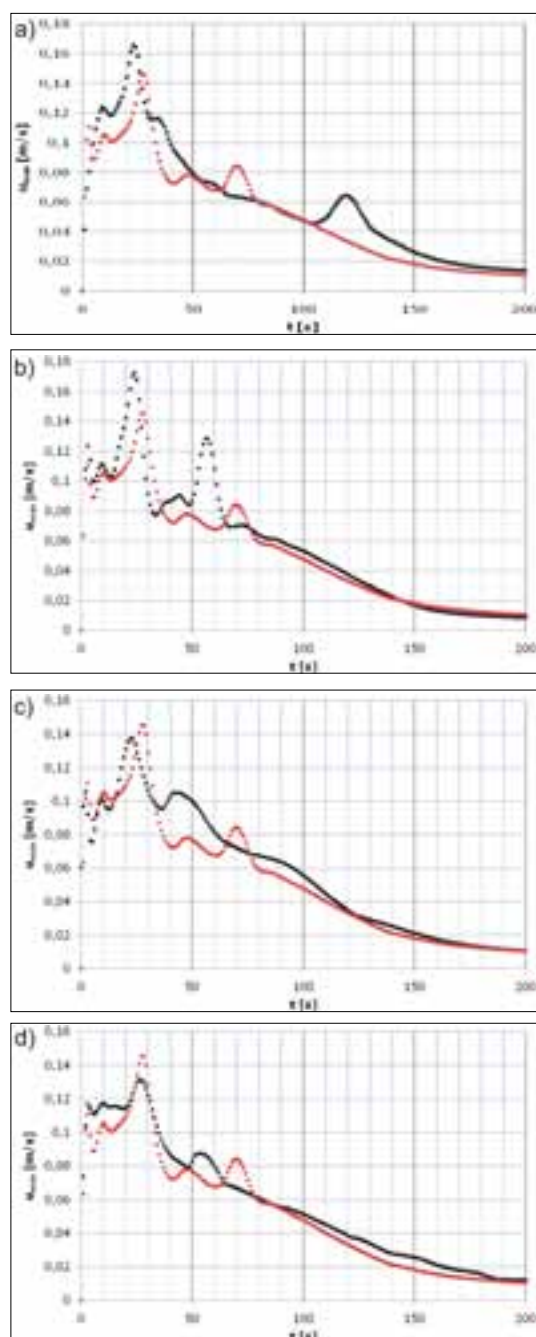
Kolejnym elementem pracy była analiza zmiany w czasie maksymalnej wartości prędkości (u_{\max}) przepływu namywającego stożek osadowy. Porównano wartości maksymalne prędkości występujące w modelach o specyficznych kształtach do wartości u_{\max} występującej w modelu podstawowym.

Zmianę wartości u_{\max} dla modelu z dennicą stożkową, o kącie pochylenia 3° przedstawiono na rysunku 4a. W przypadku tego modelu przepływ namywający formuje się także w czasie zbliżonym do czasu formowania się przepływu w modelu podstawowym. Po pełnym uformowaniu się przepływu wartość u_{\max} wzrasta osiągając wartość najwyższą nieznacznie szybciej niż ma to miejsce dla przepływu namywającego w modelu podstawowym. Dla omawianego modelu wartość najwyższa u_{\max} wynosi 0,168 m/s, co stanowi 1,14 najwyższej wartości u_{\max} uzyskanej dla modelu z płaskim dnem. W przedziale czasu wirowania ($\Delta t = 30 - 140$ s) występują zmiany prędkości przepływu namywającego, a dla czasu wirowania $t = 120$ s wartość u_{\max} ponownie wzrasta osiągając 0,063 m/s, co stanowi 1,70 wartości u_{\max} przepływu namywającego zidentyfikowanego dla modelu podstawowego. Powyżej czasu wirowania $t = 170$ s oba rozkłady wartości u_{\max} są do siebie zbliżone.

Zmianę wartości u_{\max} dla modelu posiadającego stożkową dennicę o kącie pochylenia wynoszącym 20° przedstawia wykres widoczny na rysunku 4b. Dla przepływu namywającego, po pełnym jego uformowaniu się wartość u_{\max} wzrasta osiągając wartość kulminacyjną nieznacznie wcześniej niż ma to miejsce w przypadku przepływu namywającego w modelu podstawowym. Dla omawianego modelu wartość kulminacyjna u_{\max} wynosi 0,172 m/s, co stanowi 1,18 wartości kulminacyjnej u_{\max} uzyskanej dla modelu z płaskim dnem. W przedziale czasu wirowania ($\Delta t = 32 - 80$ s) występują fluktuacje prędkości przepływu namywającego, a dla czasu wirowania $t = 55$ s wartość u_{\max} ponownie wzrasta osiągając 0,128 m/s, co stanowi 1,50 wartości u_{\max} przepływu namywającego zidentyfikowanego dla modelu podstawowego. Powyżej czasu wirowania $t = 80$ s oba przebiegi wartości u_{\max} są do siebie zbliżone.

W przypadku modelu z półką osadową (dla którego zmiana u_{\max} została przedstawiona na rys. 4c) przepływ namywający formuje się w czasie zbliżonym do uzyskanego w modelu podstawowym. Wartość kulminacyjna u_{\max} przepływu namywającego występuje dla czasu wirowania $t = 22$ s (czyli nieznacznie wcześniej niż w modelu podstawowym) i wynosi 0,137 m/s, co stanowi 0,88 wartości u_{\max} przepływu formującego stożek osadu w modelu porównawczym. W przedziale czasu wirowania $\Delta t = 22 - 36$ s wartość u_{\max} maleje. Po tym czasie wzrasta ponownie osiągając dla czasu wirowania $t = 43$ s wartość 0,105 m/s, co stanowi 1,24 wartości u_{\max} uzyskanej w modelu podstawowego. W analizowanej

konstrukcji rozkład u_{\max} przepływu namywającego posiada wyższe wartości prędkości wirowania w przedziale $\Delta t = 33 - 66$ s oraz $\Delta t = 76 - 120$ s. Powyżej 120 sekundy oba rozkłady wartości u_{\max} są do siebie zbliżone.



Rys. 4. Zmiana wartości u_{\max} przepływu namywającego dla kadzi wirowej o dnie: a) stożkowym 3° , b) stożkowym 20° , c) płaskim z kanałem spustowym, d) wyposażonym w parasol dyfuzyjny (na czerwono oznaczono porównawczo u_{\max} przepływu namywającego dla modelu o kształcie podstawowym).

Rozkład wartości u_{\max} dla modelu z przewodem zasilającym parasol dyfuzyjny został przedstawiony na rysunku 4d. Tak jak w przypadku poprzednio analizowanych modeli czas formowania się przepływu namywającego jest zbliżony do czasu formowania się przepływu w modelu podstawowym. Kulminacyjna wartość u_{\max} dla przepływu namywającego występuje dla czasu wirowania $t = 27$ s i wnosi 0,131 m/s, co stanowi 0,85 wartości kulminacyjnej u_{\max} przepływu namywającego w modelu podstawowym. Dla przedziału

czasu wirowania $\Delta t = 28 - 48$ s wartość u_{\max} dla tego przypadku maleje. Dla czasu wirowania $t = 55$ s występuje kolejny wzrost wartości u_{\max} do wartości zbliżonej, do zidentyfikowanej dla rozkładu w modelu podstawowym. Po czasie wirowania $t = 90$ s oba rozkłady wartości u_{\max} są do siebie zbliżone, przy czym do 190 sekundy wirowania rozkład u_{\max} dla modelu wyposażonego w parasol dyfuzyjny posiada wartości nieznacznie wyższe od wartości u_{\max} przepływu namywającego występującego w modelu podstawowym.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza wykazała, iż dla modelu z płaską dennicą występują dość dobre uwarunkowania (w odniesieniu do kształtów specjalnych) jeśli chodzi o umiejscowienie i kinetykę przepływu namywającego stożek.

W przypadku kształtów charakterystycznych dla zbiorników występujących w konstrukcjach przemysłowych, korzystne pod względem umiejscowienia i wartości prędkości przepływu namywającego są modele o stożkowym dnie zbiornika, szczególnie o niewielkim kącie pochylenia (3°).

Kształty zbiorników przemysłowych kadzi wirowo-osadowej wyposażonych w półkę osadową lub dyfuzor brzezki mogą być stosowane wyłącznie w przypadku niskich wysokości napełnienia (o mniejszych odległościach drogi sedymentacji). Jest to związane z występującymi dla tych konstrukcji, relatywnie niższymi wartościami prędkości przepływu namywającego.

Przeprowadzone badania symulacyjne umożliwiają optymalizację konstrukcji geometrii zbiorników przemysłowych kadzi wirowych, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji dna zbiornika.

LITERATURA

- [1] ANSYS 12.0, dokumentacja programu, 2009.
- [2] BAMFORTH C. 2003. *Beer: tap into the art and science of brewing*. Second Edition, Oxford University Press.
- [3] BRIGGS D.E., BOULTON, C.A., BROOKES P.A., STEVENS, R. 2004. *Brewing, science and practice*, woodhead publishing ltd. CRS Press, s. 353.
- [4] DÜRHOFT A. 1988. *Experimentelle untersuchung der instationären drehströmung im absetzbehälter „whirlpool“*. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14, Nr 38. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [5] EINSTEIN A. 1926. *Die Ursache der Maänderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baer'schen Gesetzes*. Naturwissenschaft, 14(2), 223-224.
- [6] JAKUBOWSKI M. 2008. *Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na proces zawirowań powstających w kadzi wirowo-osadowej podczas klarowania zawiesin*. Praca doktorska, Politechnika Koszalińska.

SIMULATING ANALYSIS OF SILTENG FLOW OCCURRING IN GEOMETRICALLY SPECIFIC CONSTRUCTIONS OF WHIRLPOOL

SUMMARY

This paper presents simulation analysis of settling hot trub secundary flow occurring in the whirlpool. The subject of analysis was whirlpool vessels flow which occurs in the shapes of industrial construction. The aim of analysis were evaluation of the changing influence shape of vessels constructional solutions on the swirling process forming and secundary flow evolution which is responsible for hot trub cone forming.

Key words: simulation, whirlpool, secundary flow, industrial construction.