

ETAPY FORMOWANIA SIĘ STOŻKA OSADU W ZBIORNIKU TESTOWYM KADZI WIROWEJ WHIRLPOOL*

Marek Jakubowski, Monika Sterczyńska

Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska

Aleksander Poreda

Katedra Technologii Fermentacji i Mikrobiologii Technicznej, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Streszczenie. Artykuł stanowi prezentację wyników badań eksperymentalnych przepływu mieszaniny separowanej w zbiorniku laboratoryjnej kadzi wirowej. Przedmiotem badań były charakterystyczne etapy formowania się stożka osadu w zależności od umiejscowienia (wysokości) otworu wlotowego i prędkości napełniania. Badania eksperymentalne zostały wykonane z wykorzystaniem zbiornika modelowego kadzi wirowej (tzw. whirlpoola) o pojemności $V=2$ hl i średnicy $D=640$ mm. W wyniku przeprowadzonych doświadczeń ustalono, iż w zjawisku formowania się stożka można wydzielić pewne charakterystyczne stany. W ramach przeprowadzonych badań porównano czasy ich występowania, a poprzez ich porównanie określono najkorzystniejsze prędkości napełniania, a także najkorzystniejsze wysokości umiejscowienia otworu wlotowego.

Słowa kluczowe: whirlpool, stożek osadu, ruch wirowy, torus

Wstęp

W procesie technologicznym produkcji brzezki piwnej występuje operacja usuwania tzw. osadu gorącego. Jest to produkt uboczny chmielenia brzezki podczas jej gotowania. Gorący osad jest mieszaniną konglomeratów białkowych i resztek chmielu (Briggs i in., 2004). Z punktu widzenia prawidłowej realizacji procesu technologicznego należy dążyć do całkowitego usunięcia osadu gorącego, gdyż utrudnia on znacząco lub też uniemożliwia całkowicie realizację dalszych operacji przetwórczych (Kunze, 2010).

Do usuwania osadu gorącego stosowano kadź osadową, wykorzystującą zjawisko sedymentacji grawitacyjnej, ponieważ osad gorący posiada ciężar właściwy większy od

* Praca naukowa finansowanego ze środków na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy nr NN313429639

ciężaru właściwego brzezki, a więc dość dobrze osadza się na dnie zbiornika. Unowocześnioną konstrukcją kadzi osadowej jest kadź wirowa (nazywana potocznie whirlpoolem), która jest obecnie na wyposażeniu większości instalacji procesowych warzelni browarów na cały świat. Konstrukcja zbiornika separatora tego typu to cylindryczne naczynie o płaskim, pochylonym dnie z jednoprocentowym spadkiem w kierunku otworu spływu umiejscowionego w dennicy zbiornika. Relacja wysokości napełnienia naczynia brzezka (H) do jego średnicy (D) wynosi zazwyczaj 1:1, choć w rozwiązaniach projektowanych i wykonywanych często wynosi ok. 0,5 (GEA-Huppmann, 2007). Naczynie whirlpoola posiada otwór wlotowy, który jest umiejscowiony stycznie, dzięki temu uzyskuje specyficzny ruch wirowy separowanej mieszaniny brzezki i osadu gorącego. Zbiornik separatora nie posiada wewnątrz żadnych elementów zabudowy, aby nie utrudniać rotacji brzezki, w wyniku której osad gorący gromadzi się w postaci stożka w centralnej przestrzeni przy dnie zbiornika. Zjawisko to nosi nazwę tzw. efektu filizanki herbaty i zostało po raz pierwszy opisane przez człowieka obdarzonego jednym z najwybitniejszych umysłów naszych czasów (Einstein, 1926).

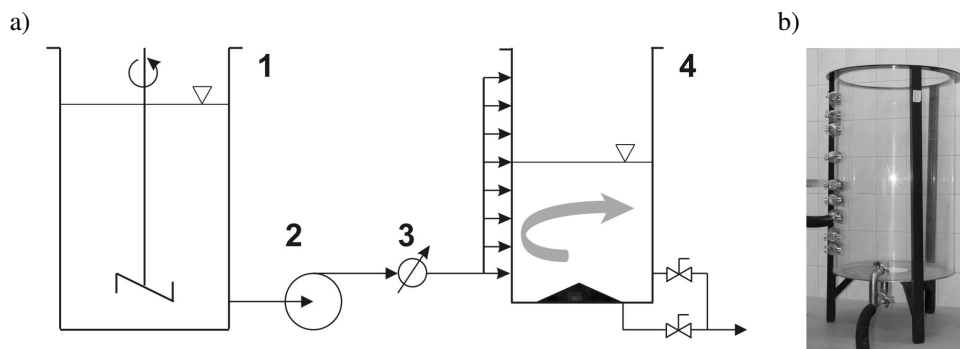
Cel pracy

W przyrodzie ruch wirowy jest powszechnie występującym rodzajem ruchu płynu, przy tym jest najmniej poznanym i opisanym formalnie. Formowanie się stożka osadu w whirlpoolu pod wpływem ruchu wirowego mieszaniny jest zagadnieniem przepływu występującego naturalnie i samoistnie. Wobec powyższego istnieją ograniczone możliwości sterowania samym zjawiskiem. Również zmiana wartości parametrów procesowych możliwych do zadania nie pozwala na np. redukcję jego występowania (dotychczas nie ustalono minimalnej wartości granicznej prędkości napełniania zbiornika, dla której zjawisko nie występuje). Także zakres optymalnych wartości prędkości i wysokości napełniania zbiornika nie został dotychczas jednoznacznie określony i jest prezentowany w dostępnej literaturze w dość szerokim zakresie. Dlatego też celem niniejszej pracy było wstępne określenie wpływu warunków napełniania (prędkości oraz wysokości położenia otworu zasilającego) posiadanego zbiornika laboratoryjnego kadzi wirowej whirlpool, na zjawisko formowania się stożka osadu. Z uwagi na ograniczenia procesowe i konieczność uzyskania warunków powtarzalnych napełniania i wirowania separowanej mieszaniny wykorzystano do badań osad zastępczy w postaci cząstek granulatu tworzywa polimerowego (PS).

Stanowisko badawcze i plan badań

Do pomiarów wykorzystano posiadane stanowisko badawcze (rys. 1) wyposażone w zbiornik wstępny do przygotowania mieszaniny modelowej, posiadający zamontowane mieszadło śmigłowe, osadzone na trzpieniu przyłączonym do silnika z przekładnią zmniejszającą częstość obrotową. Instalacja posiadała pompę (opcjonalnie), przepływomierz i przewody rurowe. Kluczowym elementem stanowiska był zbiornik kadzi wirowej wykonanej z PMMA (rys. 1b). Średnica zbiornika to $D=640$ mm, wysokość nominalna napełnienia wynosiła $H=640$ mm. Aby możliwe było prowadzenie badań dotyczących wpływu

umiejscowienia otworu wlotowego, zbiornik został wyposażony w zestaw dziewięciu otworów, z których sześć umiejscowionych było powyżej typowych wysokości właściwych dla aparatów przemysłowych. Na potrzeby regulacji natężenia przepływu podczas napełniania pompa zasilana była przez falownik.

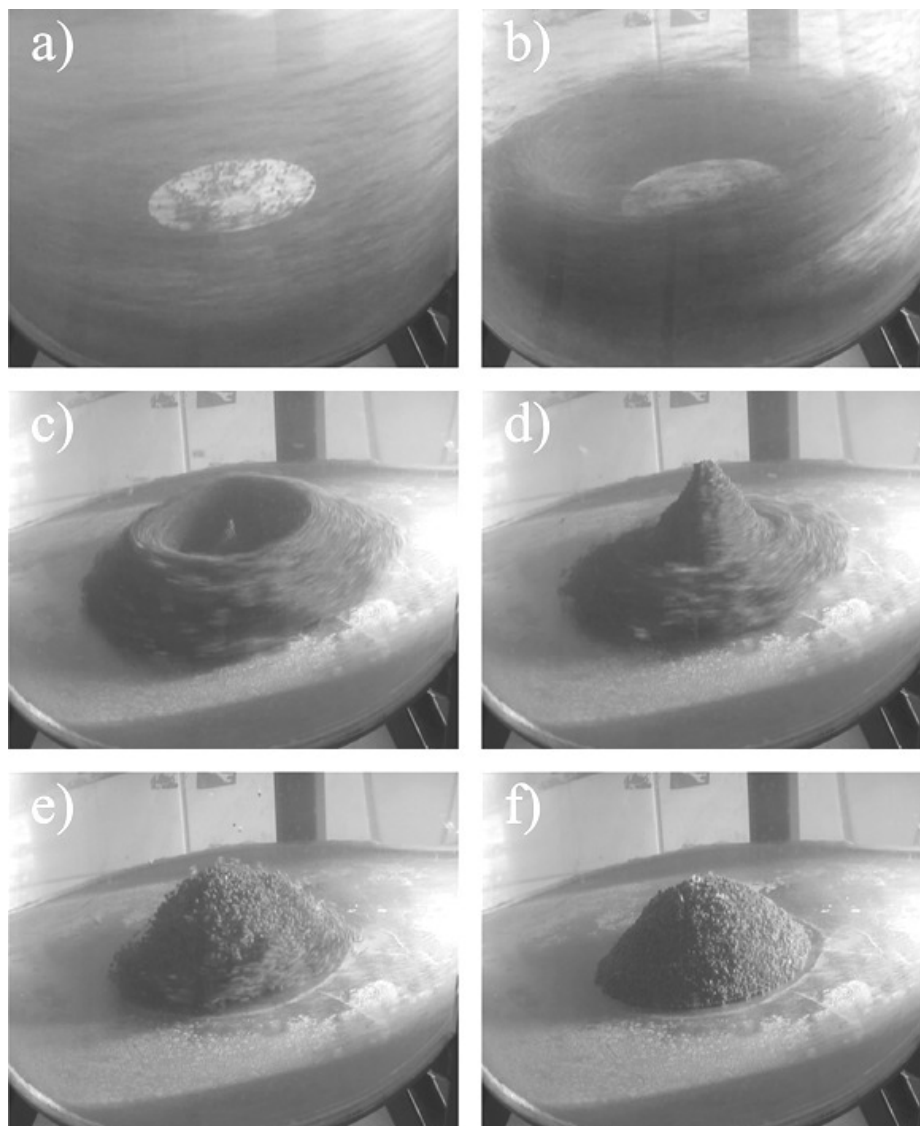


Rysunek 1. Stanowisko badawcze: a) schemat: 1) zbiornik do preparacji mieszaniny, 2) pompa, 3) przepływomierz PM 390, 4) laboratoryjna kadź wirowa whirlpool; b) widok ogólny zbiornika (po lewej stronie widoczne końcówki otworów wlotowych)
 Figure 1. Test stand a) diagram: 1) container for preparing the mixture, 2) pump, 3) flow-meter PM 390, 4) laboratory whirlpool vat 5) general view of the test tank (inlets are presented on the left side)

Elementy pomocnicze w stanowisku badawczym to kamera i aparat fotograficzny, którymi obrazy zostały zarejestrowane. Kamera umieszczona została z boku zbiornika whirlpoola, co umożliwiło filmowanie i pośrednio pomiar czasu każdego z wirowań. Czas formowania stożka osadu był mierzony od momentu kiedy do kadzi z otworu zasilającego zaczynała wpływać separowana mieszanina. Aparat był także umiejscowiony z boku kadzi, co pozwoliło na wykonywanie zdjęć uformowanego stożka osadu każdorazowo pod tym samym kątem. Fotografowanie oraz nagrywanie formowania się stożka osadu możliwe było dzięki wykonaniu kadzi z przezroczystego materiału.

Plan badań został podzielony na dwa etapy. Pierwszym z nich było wykonanie serii wirowań dla zmiennej wysokości umiejscowienia otworu wlotowego. Zbiornik laboratoryjny wyposażony jest w 9 otworów wlotowych (dodatkowo podano relacje w odniesieniu do wymiaru średnicy zbiornika): $h_1=160 \text{ mm}=0,25D$; $h_2=224 \text{ mm}=0,35D$; $h_3=320 \text{ mm}=0,5D$; $h_4=416 \text{ mm}=0,65D$; $h_5=480 \text{ mm}=0,75D$; $h_6=640 \text{ mm}=D$; $h_7=800 \text{ mm}=1,25D$; $h_8=864 \text{ mm}=1,35D$; $h_9=960 \text{ mm}=1,5D$.

Celem pierwszej części eksperymentu było określenie wpływu wysokości, na której znajdował się otwór zasilający w kadzi wirowej, na różnice w czasie występowania poszczególnych, charakterystycznych etapów formowania się stożka osadu (rys. 2). We wcześniejszych pracach (Jakubowski, 2009a, 2009b) określono etapy charakterystyczne tego zjawiska. Wyróżnione stany opisano w podpisie rysunku, przyporządkowując im indeksy dla symbolu czasu t . W tej części badań stała była wartość prędkości napełniania wynosząca $u_{i1}=1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, relacja $H:D=1$, a koncentracja osadu została ustalona na poziomie 1%.



Rysunek 2. Etapy formowania się stożka osadu: a) ruch cząstek osadu w przestrzeni zewnętrznej zbiornika, b) początek formowania się osadu w kształcie torusa, c) zamknięcie się torusa – początek formowania się stożka osadu, e) ruchomy stożek osadu, f) całkowicie uformowany stożek osadu – koniec wirowania (Wiedro-Stępińska, 2012)

Figure 2. Stages of forming a sediment cone a) movement of particles around the outer area of the tank b) beginning of forming the sediment into a thorus shape c) closing of the thorus - a cone emerges d) the cone in motion e) the fully formed sediment cone- the whirling process is over (Wiedro-Stępińska, 2012)

Druga część badań zakładała zmianę prędkości napełniania dla trzech najniższych wysokości umiejscowienia wlotu do whirlpoola. Wybrano także wartości prędkości z przedziału podawanego przez literaturę jako właściwą dla napełniania kadzi wirowej (Jakubowski i Diakun, 2006). Do badań wybrano (ze względu na możliwość regulacji i powtarzalność) wysokość napełnienia h_1 ; h_2 i h_3 oraz wartości prędkości wynoszące $u_{i1}=1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $u_{i2}=2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $u_{i3}=2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ i $u_{i4}=3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Celem drugiej części badań było określenie wpływu prędkości w powiązaniu z wysokością, na której znajdował się otwór zasilający whirlpool, na różnice w czasie występowania poszczególnych, charakterystycznych etapów formowania się swojej postaci geometrycznej formującego się stożka osadu. W części tej stała była jedynie wartość relacji $H:D=1$ i koncentracja osadu wynosiła 1%.

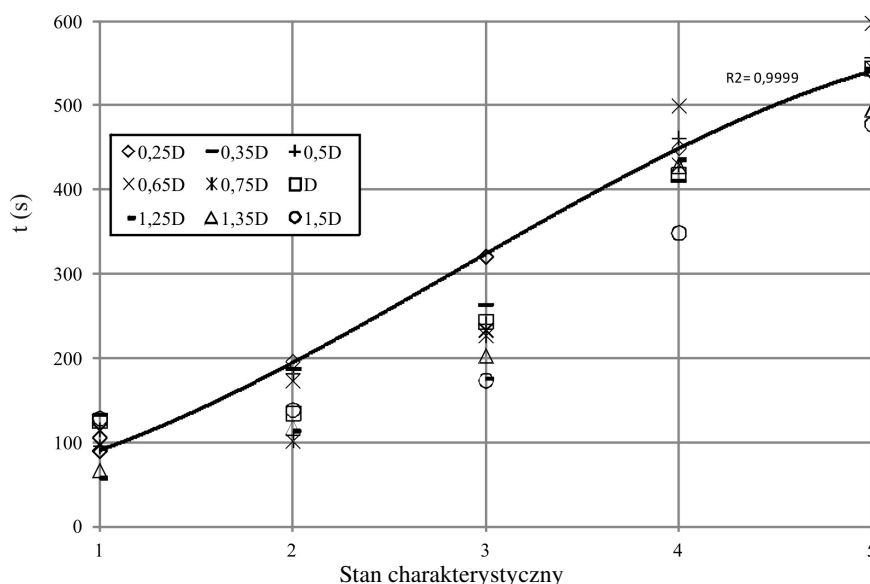
W obu częściach badań wirowania prowadzono przy pięciokrotnym powtórzeniu dla każdego nastawu parametrów. Prezentowane czasy występowania stanów charakterystycznych są wartościami uśrednionymi.

Analiza wyników badań

Wirowania rejestrowane z wykorzystaniem kamery i wykonane aparatem zdjęcia pozwoliły na przeprowadzenie analizy formowania się stożka osadu. Na ich podstawie porównano czasy występowania stanów charakterystycznych tego zjawiska. Na rysunku 3 przedstawiono wykres z naniesionymi wartościami czasów występowania stanów charakterystycznych właściwych dla pierwszej części badań.

Analiza wykresu pozwala określić, iż czas formowania się stożka osadu, w zależności od wysokości, na której znajdował się otwór zasilający w kadzi (biorąc pod uwagę wszystkie stany charakterystyczne), zawiera się w przedziale od 58 do 598 sekund. Najkrótszy czas do wystąpienia początkowego etapu formowania się torusa uzyskano przy wysokości otworu zasilającego $1,25D$. Najdłuższy czas całkowity formowania się stożka uzyskano przy napełnianiu z wykorzystaniem otworu wlotowego umiejscowionego na wysokości $0,65D$. Formowanie się torusa, w zależności od wysokości otworu wlotowego, przebiegało w przedziale czasu od 50 do 150 sekund. Formowanie osadu w kształt torusa zaistniało najwcześniej dla napełniania realizowanego z wysokości otworu $1,25D$, natomiast najpóźniej dla wysokości $0,35D$.

Analiza porównawcza czasów (dla wszystkich wariantów wysokości napełniania ze stałą prędkością) występowania zamknięcia torusa i stanu obracającego się stożka osadu pozwala stwierdzić, iż czasy wystąpienia tych stanów są najkrótsze dla napełniania z wysokości większych niż średnica zbiornika. Dość interesujące jest to, iż czas całkowitego wirowania był najkrótszy w przypadku maksymalnej analizowanej wysokości umiejscowienia otworu zasilającego.



Rysunek 3. Wykres czasów występowania dla stanów charakterystycznych podczas formowania się stożka osadu w kadzi wirowej (na osi odciętych: 1 – początek formowania się torusa (rys. 2b); 2 – zamknięcie się torusa (rys. 2c); 3 – obracający się stożek (rys. 2d); 4 – stożek nieruchomy (rys. 2e); 5 – całkowite zatrzymanie i uformowanie się stożka (rys. 2f))

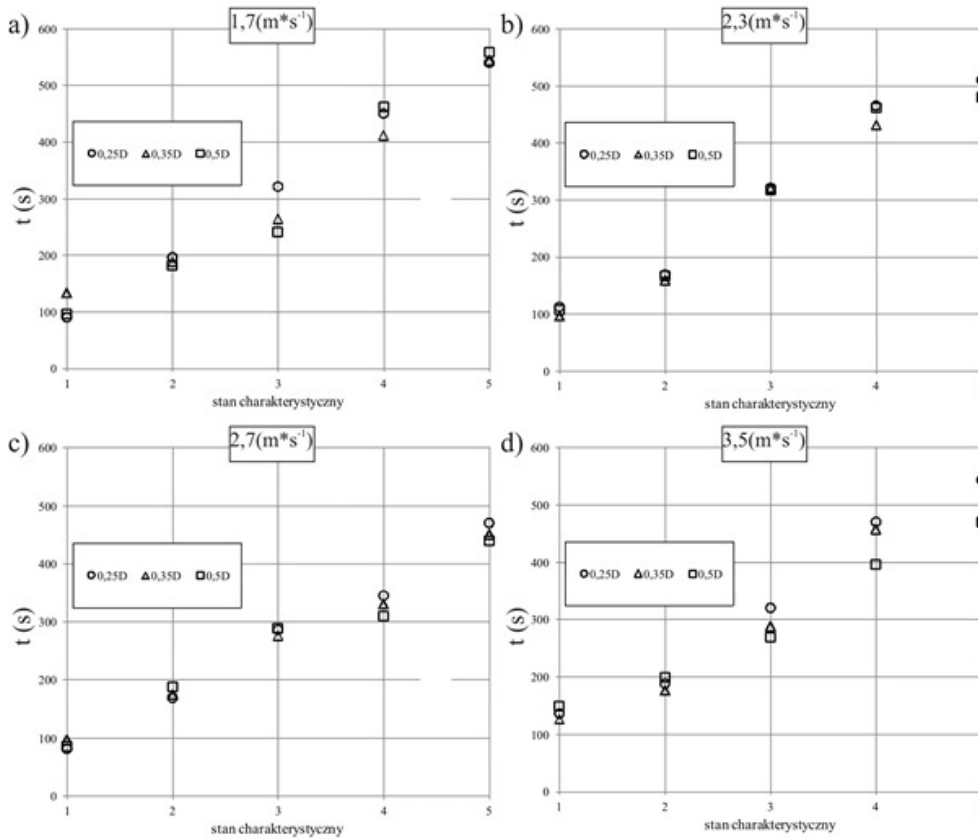
Figure 3. A plot of timing for the specific formation stages of the sediment cone inside the whirlpool (abscissa: 1 – beginning of thorus formation (fig. 2b), thorus closes (fig. 2c), 3 – cone rotates (fig. 2d), cone remains still (fig. 2e), 5 – cone completely stopped and fully formed (fig. 2f))

Na rysunku 4 przedstawiono wykresy z naniesionymi wartościami czasów występowania stanów charakterystycznych właściwych dla drugiej części badań.

Wykorzystując najniższą z badanych prędkości $u_{i1}=1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ napełniania zbiornika laboratoryjnego kadzi wirowej (rys. 4a), uzyskano najdłuższy czas całkowitego zatrzymania i uformowania się stożka osadu.

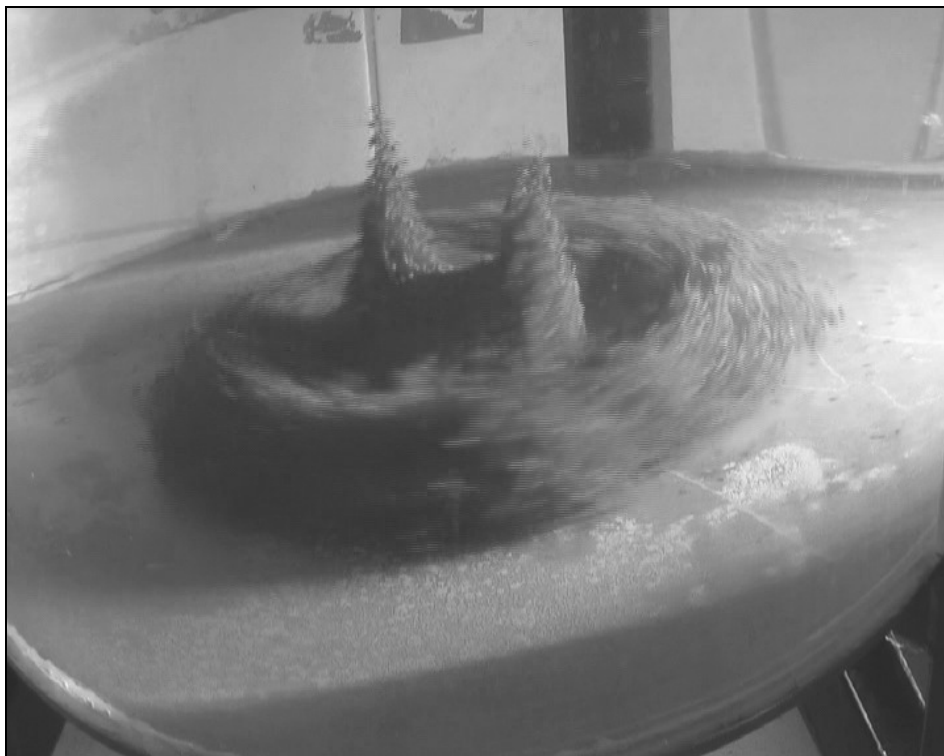
Wyniki badań dla pomiaru czasu całkowitego wirowania o wartościach prędkości napełniania powyżej $u_{i1}=1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (rys. 4b, 4c, 4d) wskazują, iż najmniej korzystne warunki występują dla stanu 3, 4 i 5 etapu formowania się stożka osadu dla wlotu umiejscowionego najbliższej dennicy zbiornika.

Czasy w poszczególnych stanach charakterystycznych przy prędkości napełniania $u_{i2}=2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz $u_{i3}=2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, niezależnie od wysokości otworu zasilającego zbiornik laboratoryjny, osiągały zbliżone wartości. Początek formowania się torusa dla prędkości napełniania u_{i4} przekracza 100 sekund dla wszystkich rozpatrywanych wysokości napełniania.



Rysunek 4. Wykresy czasów występowania dla stanów charakterystycznych podczas formowania się stożka osadu w kadzi wirowej (na osi odciętych wartości jak w rys. 3) dla prędkości napełniania: a) $u_{i1}=1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) $u_{i2}=2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c) $u_{i3}=2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, d) $u_{i4}=3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
 Figure 4. A plot of timing for the specific formation stages of the sediment cone inside the whirlpool (abscissa: same as pic 3) for the speed of filling a) $u_{i1}=1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, b) $u_{i2}=2,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, c) $u_{i3}=2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, d) $u_{i4}=3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ Analiza wyników pomiarów czasów występowania

W trakcie badań ustalono, iż za stan charakterystyczny formowania się stożka osadu nie można przyjąć efektów występowania lokalnych przepływów zawirowanych w postaci tzw. wirów planetarnych, które są przedstawiane w literaturze (np. w publikacjach prof. Denka). Okazuje się, że podczas prowadzenia badań tylko dla kilku przypadków udało się uzyskać tego typu przepływy wirowe, objawiające się występowaniem przy dnie charakterystycznych par rurek wirowych podrywających osad (Dürholt, 1988). Na rysunku 5 przedstawiono przykładową fotografię rurek wirowych wirów planetarnych dla przykładowego wirowania, dla którego zjawisko wystąpiło.



Rysunek 5. Oddziaływanie na stożek osadu chwilowo występujących wirów planetarnych (na fotografii formujący się stożek osadu dla otworu zasilającego umiejscowionego na wysokości $h_3 = 320 \text{ mm} = 0,5D$ i prędkości $u_{i3} = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Figure 5. Influence of planetary vortices occurring temporarily on the sediment cone (the picture presents formation of the sediment cone for the inlet positioned at a height $h_3 = 320 \text{ mm}$ and speed $u_{i3} = 2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Wnioski

1. Wysokość, na której umiejscowiony jest otwór zasilający zbiornik kadzi wirowej, warunkuje przebieg poszczególnych stanów formowania się stożka osadu, a przede wszystkim – całkowity czas wirowania. To samo dotyczy napełniania o zmiennej wartości prędkości.
2. W przypadku serii wirowań ze stałą wartością prędkości napełniania uzyskano korzystne, niższe wartości czasu występowania etapów formowania się stożka osadu dla wysokości umiejscowienia otworów wlotowych o wyższym wymiarze od wymiaru średnicy. Taka sytuacja jest bardzo interesująca, ponieważ większość rozwiązań konstrukcyjnych aparatów wykorzystywanych przemysłowo posiada otwór wlotowy umiejscowiony tuż nad dennicą zbiornika.

3. W przypadku analizy wyników pomiarów czasu całkowitego wirowania dla wartości prędkości napełniania powyżej u_{t1} stwierdzono, iż pozornie najmniej korzystne warunki występują dla wlotu umiejscowionego najbliżej dennicy zbiornika. Wynika to prawdopodobnie z faktu, iż napełnianie prowadzone przez otwór wlotowy umiejscowiony najbliżej dennicy pozwala na napełnianie o zredukowanym efekcie uderzenia strumienia o dno zbiornika (w wyniku oddziaływania grawitacji) w początkowej fazie napełniania. Taka sytuacja prowadzi do powstawania strat energii wirowania, co przyczynia się do mniejszej intensywności występowania poszczególnych etapów formowania stożka osadu.

Literatura

- Briggs, D.E.; Boulton, C.A.; Brookes, P.A.; Stevens, R. (2004). *Brewing Science and Practice*. Woodhead Publishing Ltd., ISBN 1 85573 490 7.
- Dürholt, A. (1988). Experimentelle Untersuchung der instationären Drehströmung im Absetzbehälter "Whirlpool". *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14*, 38. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Einstein, A. (1926). Die Ursache der Mäanderbildung der Flußläufe und des sogenannten Baer'schen Gesetzes. *Naturwissenschaft*, 14(2), 223-224.
- GEA-Huppmann (2007). Materiały wewnętrzne firmy.
- Jakubowski, M.; Diakun, J. (2006). Wpływ kształtu połączenia pobocznic i dna na tworzenie się zawirowania namywającego w kadzi wirowo-osadowej, *Inżynieria Rolnicza* 7(82), 223-230.
- Jakubowski, M. (2009a). *Kadz wirowa, wykorzystywana zwłaszcza w browarnictwie oraz sposób jej napełniania*. Politechnika Koszalińska, Zgłosz. P. P388831 z 18.08.2009.
- Jakubowski, M. (2009b). Wpływ wysokości napełniania kadzi wirowo-osadowej na kinetykę przepływu wtórnego namywającego osad. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, 65-68.
- Kunze, W. (2010). *Technology Brewing and Malting*, VLB Berlin, ISBN 978-3-921690-64-2.
- Wiedro-Stempińska, A. (2012). *Badania wpływu warunków napełnienia i stopnia koncentracji zawiesiny na formowanie się stożka osadu w kadzi wirowej*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Koszalińska.

FORMATION PHASES OF A SEDIMENT CONE INSIDE A TEST TANK OF A WHIRLPOOL VAT

Abstract. The article presents results of the experimental research on the flow of mixture separated inside a laboratory cycling vat. The specific stages of forming the sediment cone depending on the position of the inlet (the placement height) and the speed of filling were the subject of the research. The research was carried out using a cycling vat (also called a whirlpool) scale model with capacity of $V = 2\text{hl}$ and diameter of $D = 640\text{ mm}$. As a result of the experiments it was determined that as a part of the phenomenon of forming the cone, a few specific stages can be distinguished. The research involved a comparison of their timing, which allowed determination of the optimal speed of filling as well as the best height of placing the inlet.

Key words: whirlpool, sediment cone, rotational motion, torus

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