

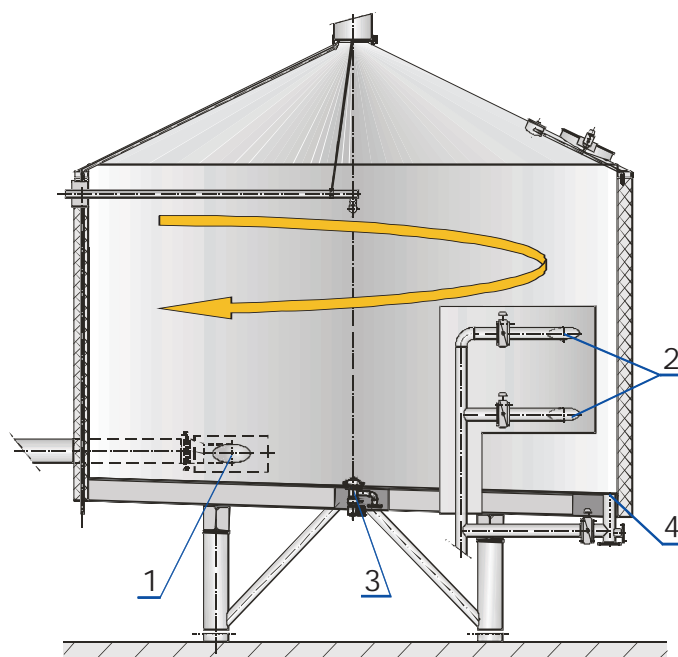
Dr inż. Marek JAKUBOWSKI
Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska

WPŁYW WYSOKOŚCI NAPEŁNIENIA KADZI WIROWO-OSADOWEJ NA KINETYKĘ PRZEPŁYWU WTÓRNEGO NAMYWAJĄCEGO OSAD[®]

Wysokość napełnienia zbiornika kadzi wirowej podczas realizacji operacji usuwania osadu gorącego z brzezki piwnej jest zmienna dla każdego przypadku z osobna. Zależna jest ona od parametrów konstrukcyjnych i procesowych oraz objętości wirowanej brzezki. W publikacji przeanalizowano wpływ wysokości napełnienia zbiornika na zmianę kinetyki przepływu wtórnego namywającego stożek osadu. Analizę wykonano na podstawie badań symulacyjnych.

WPROWADZENIE

Kadz wirowa (zwana powszechnie whirlpool) jest aparatem wykorzystywanym w browarnictwie do klarowania brzezki bezpośrednio po jej gotowaniu. Jest to separator w postaci cylindrycznego zbiornika (rys. 1) napełnianego przewodem rurowym usytuowanym stycznie na jego obwodzie, przez co uzyskuje się ruch wirowy brzezki. Separacja następuje w sposób naturalny (grawitacyjny), wspomagany ruchem zawirowanym, w wyniku którego powstaje przepływ wtórny namywający osad w formie stożka. Występowanie tego przepływu, to obszar zbliżony do dna zbiornika w tzw. warstwie granicznej Ekmana [2]. Oddziaływanie przepływu namywającego objawia się występowaniem zjawiska zwanego efektem filiżanki herbaty, który polega na formowaniu się sedymentującego osadu w postaci stożka, w środkowej części dna zbiornika.



Rys. 1. Schemat budowy kadzi wirowej: 1) styczne zasilanie; 2) otwory spustowe; 3) dysza rozbijająca stożek osadu; 4) otwór spustowy osadu [GEA-Huppmann 2008].

Wysokość napełnienia zbiornika (H) kadzi wirowej podczas realizacji operacji usuwania osadu gorącego zależy jest od parametrów konstrukcyjnych zbiornika i objętości tzw. warki przekazywanej z kotła warzelnego, która z kolei jest zależna od zawartości ekstraktu brzezki. Praktyka produkcyjna wskazuje, iż wysokość ta mieści się zazwyczaj w przedziale od 0,5 do 1 wymiaru średnicy (D) zbiornika. Z podanego przedziału niższe wysokości napełnienia charakterystyczne są dla dużych pojemności zbiorników kadzi wirowej, większe zaś występują w rozwiązaniach konstrukcyjnych separatorów pracujących na małych pojemnościach, co związane jest z czasem i drogą sedymentacji osadu gorącego. Istnieją także rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne, dla których wysokość napełnienia przekracza wymiar średnicy zbiornika.

CEL I ZAKRES BADAŃ

Celem badań zaprezentowanych w artykule była analiza wpływu proporcji wysokości napełnienia do średnicy zbiornika kadzi wirowej brzezki piwnej, na stan i zmianę kinetyki przepływu wtórnego odpowiedzialnego za formowanie się stożka osadu. Wyniki analiz symulacyjnych przedstawiają czysto hydrodynamiczny aspekt wirowania brzezki, a więc nie uwzględniają oddziaływań między cząstkami osadu separowanego w stożku. Ocenie podlegał wpływ rozkładu prędkości maksymalnej przepływu namywającego na zjawisko formowania się stożka.

Wymiary geometryczne modeli symulacyjnych zostały zadeklarowane jako właściwe dla posiadanego obiektu rzeczywistego w postaci laboratoryjnej kadzi wirowej o wymiarach: $D = 0,64$ m i maksymalnej wysokości napełnienia $H_{\max} = 1,2$ m. Przy napełnieniu zbiornika dla proporcji $H : D = 1$ jego objętość nominalna wynosi $V_{\text{nom}} = 0,205$ m³.

W programie badań symulacyjnych przeprowadzono serię analiz dla zmiennej wysokości napełnienia zbiornika kadzi wirowej. Zadeklarowane wysokości nalewu wynosiły:

- 0,16 m ($H : D = 0,25$);
- 0,32 m ($H : D = 0,50$);
- 0,48 m ($H : D = 0,75$);
- 0,64 m ($H : D = 1,00$);
- 0,80 m ($H : D = 1,25$);
- 0,96 m ($H : D = 1,50$).

MODEL I NARZĘDZIE MODELOWANIA

Zagadnienie modelowane było w cylindrycznym układzie współrzędnych jako płaskie, osiowo-symetryczne z wirowaniem (przepływ swirl). Jako warunki początkowe deklarowano prędkość obwodową cieczy, o maksymalnej wartości 1, 5 m/s, o rozkładzie zbliżonym do występującego podczas końcowego etapu napełniania. Odwzorowaniem kształtu swobodnej powierzchni w zerowym kroku symulacji była jej deklaracja w postaci pochylenia górnej płaszczyzny słupa cieczy o kąt właściwy dla danego nalewu, wynikający z przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Symulację zrealizowano z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS Flotran, który jako narzędzie CFD pozwala na uzyskanie rozwiązania numerycznego układu równań opisującego ruch płynu. Podstawowe równania rozwiązywane przez program to: równanie zasady zachowania masy, równanie zasady zachowania momentów oraz równania wynikające z zasady zachowania energii. Ze względu na charakter ruchu zagadnienie modelowano jako turbulентne stosując model turbulencji SST (Shear Stress Transport) [1].

Wygenerowano sześć modeli o stałej ilości elementów. Ich dyskretyzację wykonano przy pomocy dostępnego w bibliotece elementu siatki o nazwie Fluid 141, który posiadał 7 stopni swobody (VX, VY, VZ, PRES, TEMP, ENKE, ENDS). Wykonano sześć cykli obliczeniowych, ustalono maksymalną ilość iteracji w jednym kroku czasowym na 2000. Ze względu na analizę ze swobodną powierzchnią zagęszczono krok całkowania dla pierwszych kroków czasowych obliczeń oraz zadeklarowano kryterium zbieżności dla ciśnienia równe $1e-12$ (domyślna wartość wynosi $1e-6$). Aby poprawić stabilność rozwiązania wprowadzono wartość współczynnika relaksacji (0,5) MIR (Modified Inertial Relaxation) dla równań ruchu i turbulencji.

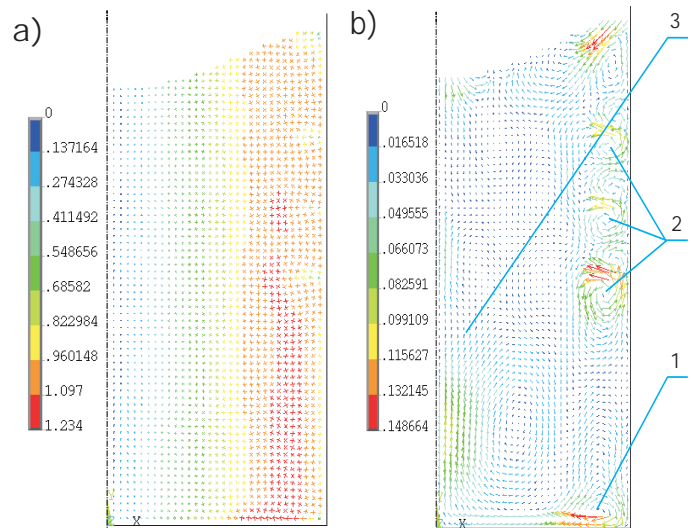
W wyniku zrealizowanego cyklu badań symulacyjnych otrzymano pliki wynikowe dla stopni swobody w postaci tablic wartości nodalnych i elementarnych dla każdego kroku czasowego (zapis co 1 krok czasowy zadeklarowany jako sekunda wirowania). Na podstawie wartości tablicowych wygenerowano wektorowe mapy pola prędkości ruchu cieczy dla interesującego, z punktu widzenia prowadzonej analizy, obszaru występowania przepływu namywającego. Przedmiotem analizy było 200 pierwszych kroków czasowych symulacji.

ANALIZA WYNIKÓW SYMULACJI

Analiza map rozkładu prędkości pozwoliła wyróżnić zasadnicze elementy wchodzące w skład struktury przepływów w zawirowanym ruchu płynu w kadzi wirowo-osadowej. Są to:

- przepływ pierwotny (rys. 2a);
- przepływ wtórny namywający stożek (rys. 2b-1);
- zawirowania wtórne przyścienne (rys. 2b-2);
- centralny przepływ wtórny (rys. 2b-3);
- inne przepływy o charakterze lokalnym.

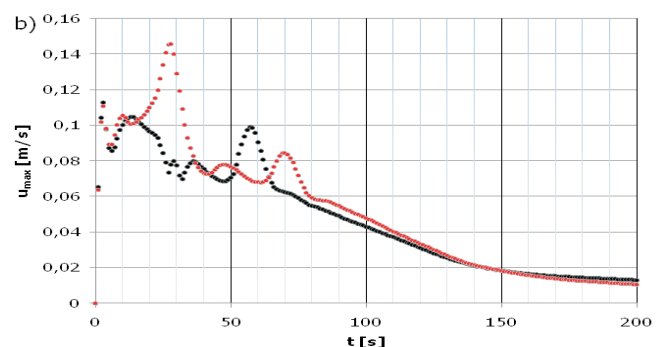
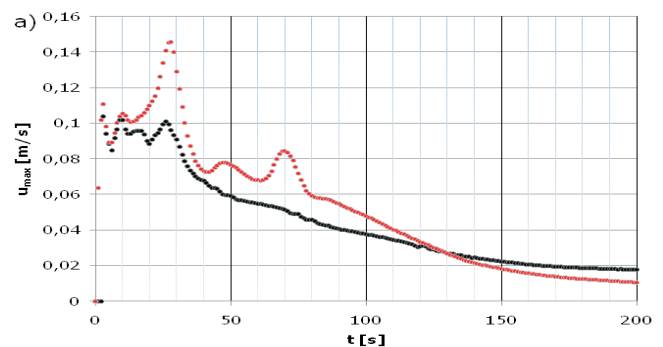
Przepływ pierwotny jest przepływem napędowym powstającym w wyniku stycznego napełniania zbiornika (w modelu symulacyjnym wynika z zadeklarowanego rozkładu prędkości). Pozostałe przepływy są konsekwencją ruchu płynu w ograniczonej cylindrycznie przestrzeni zbiornika kadzi wirowo-osadowej.

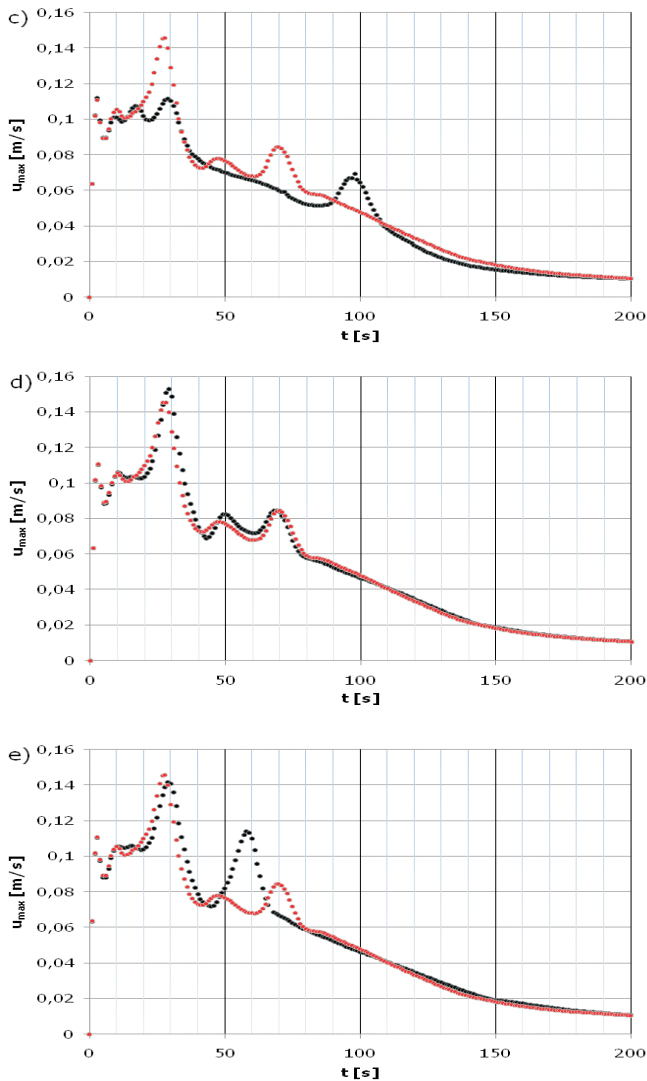


Rys. 2. Wektorowa mapa pola prędkości przepływu: a) pierwotnego; b) wtórnego, gdzie: 1) przepływ namywający osad, 2) zawirowania przyścienne, 3) przepływ centralny [Jakubowski 2008].

W dalszej części ograniczono rozważania do analizy zmiany kinetyki przepływu namywającego stożek, jako przepływu wtórnego o kluczowym znaczeniu dla spełnianej funkcji separatora.

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy obrazujące wartości maksymalnej prędkości przepływu namywającego stożek (u_{max}) dla analizowanych wysokości napełnienia zbiornika kadzi wirowo-osadowej. Jako porównawczy rozkład przyjęto zmianę prędkości u_{max} uzyskaną jako wynik obliczeń dla przepływu namywającego stożek w modelu o smukłości napełnienia $H: D=1$ (oznaczony na wykresach, na rys. 3a-3e, kolorem czerwonym). Model ten, w trakcie prowadzonych badań o charakterze eksperymentalnym, został zweryfikowany doświadczalnie. Został on nazwany modelem podstawowym.





Rys. 3. Zmiana maksymalnej wartości prędkości przepływu formującego stożek osadu dla kadzi wirowej dla smukłości napełnienia: a) 0,25; b) 0,5; c) 0,75; d) 1,25; e) 1,5; (wymienione smukłości oznaczono na wykresach kolorem czarnym, porównawczo smukłość napełnienia 1,0 oznaczono kolorem czerwonym).

Charakterystykę zmiany wartości u_{\max} przepływu namywającego występującego w modelu o smukłości napełnienia $H: D=1$ można podzielić na cztery przedziały czasowe. Pierwszy to formowanie się przepływu (od 0 do 12 sekundy wirowania). W tym przedziale wartość prędkości zmienia się skokowo, co świadczy o braku stabilności przepływu w obszarze zbliżonym do dna zbiornika. Przedział drugi (od 13 do 28 sekundy wirowania), to formujący się przepływ o rosnącej wartości prędkości, aż do wartości maksymalnej występującej w czasie $t = 28$ s. W przedziale trzecim (od 29 do 90 sekundy wirowania) występuje formowanie się stożka osadu. W tym przedziale wartość u_{\max} przepływu namywającego spada i okresowo wzrasta tworząc rozkład fluktuacyjny, co jest związane z występowaniem zawirowań przyściennych, które przemieszczając się wzdłuż ściany zbiornika włączają się do przepływu namywającego. Fluktuacyjny rozkład świadczy o formowaniu się osadu w kształt torusa, który zmniejszając średnicę zewnętrzną zostaje zebrany w obszarze centralnej części dna zbiornika. Ostatni przedział czasowy (po 90 sekun-

dzie wirowania) jest konsekwencją charakteru zmian prędkości. W tym czasie występuje namywanie osadu opadającego na dno w kierunku formującego się stożka. W tym przedziale przepływ namywający jest w pełni stabilny, a jego charakterystyka jest zbliżona do charakterystyki zmiany prędkości zawirowania napędowego i nie wykazuje występowania zaburzeń do końca całkowitego czasu wirowania.

Wykres przedstawiony na rysunku 3a dotyczy rozkładu wartości u_{\max} dla modelu o smukłości napełnienia $H: D = 0, 25$. W porównaniu do rozkładu uzyskanego dla modelu podstawowego charakteryzuje się on dłuższym czasem formowania się przepływu namywającego. Posiada też niższą prędkość maksymalną stanowiącą 0, 60 wartości u_{\max} przepływu dla modelu podstawowego. Czas występowania maksymalnej wartości prędkości jest zbliżony do czasu uzyskanego dla modelu podstawowego. Charakterystycznym zjawiskiem dla tego rozkładu jest brak występowania wzrostu jego wartości prędkości pomiędzy 50 a 100 sekundą wirowania. Jest to związane z brakiem występowania zawirowań przyściennych dla tej smukłości napełnienia, co może być konsekwencją znacznego ograniczenia aktywnej powierzchni hamowania na ścianach zbiornika dla tak niskiego słupa cieczy. Brak tych zawirowań wpływa jednak ujemnie na formowanie stożka, ponieważ nie występuje efekt przemieszczania osadu z obszaru zbliżonego do ścianki w kierunku dna zbiornika oraz nie występuje korzystne włączenie się zawirowań przyściennych do przepływu namywającego. Koniec rozpatrywanego przedziału czasu wirowania charakteryzuje się wyższą wartością prędkości maksymalnej przepływu namywającego, która stanowi 1, 80 wartości prędkości uzyskanej dla modelu podstawowego.

Kolejny wykres (rys. 3b) przedstawia rozkład wartości u_{\max} zawirowania namywającego dla smukłości napełnienia $H: D = 0, 50$. Dla tej smukłości napełnienia wartość u_{\max} analizowanego przepływu występuje wcześniej niż w przypadku modelu podstawowego. Wartość u_{\max} jest niższa i wynosi 0, 75 wartości u_{\max} przepływu w modelu podstawowym, przy czym występowanie maksymalnej wartości prędkości przypada wcześniej, w przedziale czasowym właściwym dla formowania się przepływu namywającego. Także wcześniej występuje wzrost prędkości spowodowany oddziaływaniem zawirowań przyściennych. Wartość kulminacyjna u_{\max} jest wyższa i wynosi 1, 20 wartości uzyskanej dla modelu podstawowego. Wartości u_{\max} dla końcowego (rozpatrywanego) czasu wirowania są w obu przypadkach do siebie zbliżone.

Dla kolejnej smukłości napełnienia $H: D = 0, 75$ rozkład u_{\max} przepływu formującego stożek osadu został przedstawiony na wykresie (rys. 3c). Rozkład ten charakteryzuje się niższą wartością kulminacyjną u_{\max} , która stanowi 0, 70 analogicznej kulminacji wartości u_{\max} dla modelu podstawowego. Czas występowania kulminacji prędkości jest zbliżony w obu przypadkach. Charakterystyczne dla tego rozkładu jest to, iż wzrost prędkości spowodowany oddziaływaniem zawirowań przyściennych występuje później, niż w modelu podstawowym. Wartość u_{\max} , w tym przypadku jest niższa i stanowi około 0, 79 analogicznej wartości uzyskanej dla modelu podstawowego. Dla końcowego rozpatrywanego przedziału czasu wirowania oba rozkłady ustalają się na jednakowym poziomie wartości u_{\max} .

Charakterystyka rozkładu prędkości dla smukłości napełnienia $H: D = 1, 25$ (rys. 3d) jest zbliżona zasadniczo do cha-

rakterystyki rozkładu uzyskanego dla modelu podstawowego. Dla tego przypadku uzyskano nieznacznie wyższą wartość kulminacyjną u_{\max} w czasie zbliżonym do czasu występowania analogicznego zjawiska w rozkładzie dla modelu podstawowego. Dla tej smukłości napełnienia występują także nieznacznie wyższe wartości u_{\max} pomiędzy 45 a 70 sekundą wirowania. Powyżej czasu wirowania $t = 140$ s oba rozkłady pokrywają się.

Ostatnim analizowanym przypadkiem jest model o smukłości napełnienia H: D = 1,50 (rys. 3e). Dla tej proporcji wartość u_{\max} jest zbliżona do wartości właściwej dla modelu podstawowego i występuje w czasie wirowania $t = 29$ s. Wzrost prędkości spowodowany oddziaływaniem zawirowań przyściennych występuje wcześniej (pomiędzy 40 a 65 sekundą wirowania) i posiada znacznie większą wartość u_{\max} , która stanowi 1,40 analogicznej wartości u_{\max} uzyskanej dla modelu podstawowego. Po upływie czasu wirowania powyżej $t = 80$ s oba rozkłady wartości u_{\max} są do siebie zbliżone.

Analizując kompleksowo wszystkie rozpatrywane przypadki należy zwrócić uwagę na jednakowe (z pominięciem pierwszej rozpatrywanej smukłości napełnienia) występowanie przedziału czasu formowania się przepływu namywającego, jego kulminację wartości prędkości maksymalnej oraz występowanie okresowego wzrostu wartości prędkości związanego z oddziaływaniem zawirowań przyściennych.

PODSUMOWANIE

Wyniki obliczeń uzyskanych na podstawie opracowanego i zweryfikowanego modelu symulacyjnego pozwalają na analizę wpływu zmian parametrów procesowych realizacji operacji usuwania osadu gorącego w kadzi wirowo – osadowej bez konieczności prowadzenia badań eksperymentalnych uwzględniających każdorazową zmianę danego parametru. Model ten może więc stanowić narzędzie wspomagania projektowania (w sensie procesowym) operacji realizowanej w tym separatorze.

Porównanie wyników dla analizowanej grupy modeli o zmiennej wysokości napełnienia pozwala na sformułowanie następujących wskazań dla praktycznej realizacji operacji usuwania osadu gorącego:

1. Korzystnie najwyższe wartości prędkości przepływu namywającego występują dla smukłości H: D = 1, 50; dla tej samej smukłości występuje także korzystny wzrost wartości prędkości związany z oddziaływaniem zawirowań przyściennych.

2. Korzystnie (o największej wartości prędkości u_{\max} po ustabilizowaniu się przepływu) utrzymywał się przepływ namywający dla smukłości H: D = 0, 25.

3. Rozkłady prędkości u_{\max} przepływu namywającego dla smukłości napełnienia H: D = 1, 00 i H: D = 1, 25 są do siebie zbliżone.

LITERATURA

- [1] ANSYS 12.0, dokumentacja programu, 2009.
- [2] Dürholt A.: Experimentelle Untersuchung der instationären Drehströmung im Absetzbehälter „Whirlpool“, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 14, nr 38. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988.
- [3] GEA-Huppmann, materiały wewnętrzne firmy, 2008.
- [4] Jakubowski M.: Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na proces zawirowań powstających w kadzi wirowo-osadowej podczas klarowania zawiesin, Politechnika Koszalińska, 2009.

INFLUENCE OF THE WHIRLPOOLS DISCHARGE HEAD ON SETTLING CONE FORMING BY SECONDARY FLOW KINETICS

SUMMARY

The whirlpools discharge head of during operation hot trub removal form wort is changing for each cases separately. Discharge head depends on constructions and processing parameters and swirling wort volume. In publication discharge head depend for secondary flow kinetic changing was analyzed. Analysis was made basic on simulation investigation.