

Analiza wyników pomiaru prędkości cieczy rotującej w kadzi wirowo – osadowej

Streszczenie: Praca przedstawia analizę wyników pomiarów prędkości wirowania cieczy w kadzi wirowo - osadowej. Badania przeprowadzono na laboratoryjnej kadzi wirowo – osadowej o średnicy $D = 0,64$ m i maksymalnej wysokości nalewu $H_{\max} = 0,92$ m. Pomiary ciśnienia hydrodynamicznego dokonano poprzez zastosowanie zaadaptowanych do tego celu rurek Pitota w postaci grzebienia pomiarowego. Przeprowadzono aproksymację wyników eksperymentalnych określając rozkład pola prędkości cieczy w kadzi. Do analizy wyników zastosowano dodatek SOLVER arkusza kalkulacyjnego EXCEL.

Słowa kluczowe: kadź wirowo-osadowa, funkcja regresji, prędkość początkowa, rozkład prędkości

Wprowadzenie

Kadź wirowo – osadowa jest zbiornikiem cylindrycznym, w którym poprzez nalew (napełnianie) cieczy po stycznej uzyskuje się jej ruch wirowy. Stosowana jest do klarowania brzezki piwnej w browarnictwie

Modelowanie komputerowe kinetyki ruchu wirowego cieczy w zbiorniku cylindrycznym wymaga założenia rozkładu prędkości dla zerowego kroku symulacji. Problemem jaki staje przed twórcą modelu numerycznego procesu ruchu wirowego jest deklaracja wartości prędkości początkowych dla całego przekroju wysokości napełnienia (nalewu). W przeprowadzonych obliczeniach symulacyjnych [Diakun, Jakubowski 2004] wirowania wody w naczyniu cylindrycznym (zbiorniku kadzi wirowo – osadowej) założono ruch wirowy o stałej prędkości kątowej w całej objętości nalewu w zerowym kroku obliczeń.

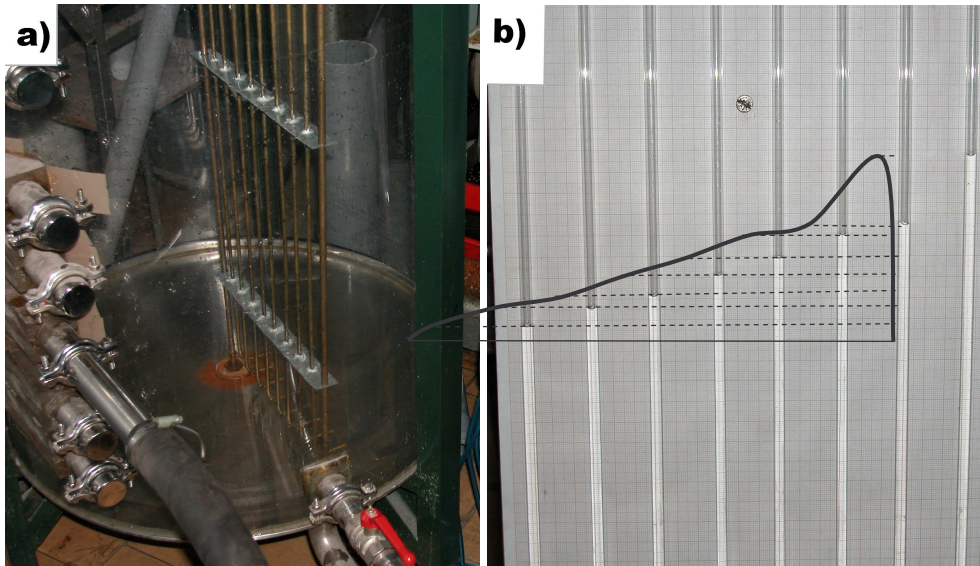
Aby uzyskać miarodajne wyniki symulacji celowym wydaje się „zdjąć” charakterystykę rozkładu prędkości w ramach badań eksperymentalnych.

Cel badań

Eksperymentalny rozkład prędkości wyznaczono z pomiaru wartości ciśnienia dynamicznego cieczy wirującej w otwartym naczyniu cylindrycznym. Celem analizy było wyznaczenie funkcji regresji opisującej otrzymany eksperymentalnie rozkład prędkości wirującej cieczy w zbiorniku kadzi wirowo – osadowej.

Stanowisko badawcze

Stanowisko pomiarowe stanowiła laboratoryjno - eksperymentalna kadź wirowo – osadowa o średnicy $D = 0,64$ m [Jakubowski 2003]. Objętość nalewu kadzi wynosiła $0,2$ m³. Odpowiada to wysokości napełnienia $H_n = 0,64$ m. Stosunek wysokości napełnienia do średnicy (H_n/D) wyniósł więc 1:1. Nalew stanowiła woda o temperaturze ok. 20 °C. Króciec wlotowy, o średnicy 0,07 m, umiejscowiony był stycznie na ścianie zbiornika na $\frac{1}{2}$ wysokości przewidywanego nalewu. Napełnianie zbiornika realizowano ze średnią prędkością napływu 1,8 m/s. Ruch wirowy uzyskiwano przez doprowadzenie wody po stycznej prostopadłej do tworzącej walca zbiornika.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego: a) grzebień pomiarowy w zbiorniku laboratoryjnej kadzi wirowej, b) przykładowy rozkład ciśnienia z naniesionym schematem odczytu

Fig. 1. View of an experimental setup: a) Pitot comb in a container of a laboratory whirling vat, b) sample pressure distribution with a plotted read-out diagram

Pomiary ciśnienia dynamicznego dokonano poprzez zastosowanie zaadaptowanych do tego celu rurek piętrzących Pitota [Troskoleński 1969]. Zaprojektowano i wykonano specjalną ruchomą ramę z osadzonymi 10 rurkami tworzącymi „grzebień pomiarowy” (rys1a). Wlot rurek rozmieszczono na promieniu zbiornika, na jednakowej wysokości. Prowadnice, na których umieszczono ramę z grzebieniem pozwalały na ustawienie wysokości umieszczenia wlotu rurek. Umożliwiało to przeprowadzenie pomiaru na dowolnej wysokości w zbiorniku. Wskazania wysokości spiętrzenia słupa wody w ustalonych odstępach czasu były fotografowane, a następnie odczytywane z dokładnością do 0,001 m (rys 1b).

Wyniki pomiarów

Wobec braku możliwości bezpośredniego pomiaru składowych prędkości cieczy w zbiorniku założono, iż dominującą składową będzie składowa prędkości pierwotnej (obwodowej) a jej charakterystyka rozkładu będzie taka sama jak charakterystyka rozkładu ciśnienia dynamicznego na promieniu zbiornika kadzi.

Pomiary wartości ciśnienia dynamicznego wykonano dla stałych, powtarzalnych warunków prowadzenia nalewu wody do zbiornika kadzi wirowo – osadowej. Wyniki pomiarów utrwalone zostały w postaci zdjęć wykonanych przy pomocy aparatu cyfrowego. Dla każdej wysokości umiejscowienia wlotu rurek pomiar powtarzano kilkakrotnie (minimalna wartość powtórzeń wynosiła trzy razy). Prezentowane wyniki pomiarów (rys. 4a, 5a) są wartościami uśrednionymi. Rozrzut wartości pomierzonych nie przekroczył 10%.

Wykorzystano do pomiaru rurki piętrzące, których zasada pomiaru polega na proporcjonalności miejscowej prędkości cieczy do pierwiastka kwadratowego z pomierzonej bezpośrednio wysokości ciśnienia dynamicznego (wzór nr 1). Prędkość przepływu (wirowania) cieczy obliczono ze wzoru określającego zależność pomiędzy ciśnieniem dynamicznym a prędkością [Troskoleński 1969].

$$v = \sqrt{2g * h} \quad (1)$$

gdzie:

v – prędkość cieczy [m/s];

g – normalne przyśpieszenie ziemskie o wartości 9,80665 [m/s²];

h – wysokość słupa cieczy spiętrzona w rurce pomiarowej [m]

Aproksymacja wyników

Funkcja, którą należało zaproksymować wyniki pomiarów, powinna spełniać dwa warunki. Przede wszystkim, w zadawalający sposób wiernie odzwierciedlać charakter (naturę) zjawiska. Jednocześnie powinna odznaczać się prostotą zapisu, aby możliwe było przetworzenie go w APDL-u (języku programowania Ansysa) tak, aby sam program nie zużywał zasobów systemowych na obliczanie funkcji wymuszenia. Ponieważ powyższe założenia wykluczają się wzajemnie zaproponowana funkcja jest kompromisem pomiędzy precyzją odwzorowania, a prostotą zapisu.

W ogólnej postaci funkcji aproksymującej rozkład prędkości wirowania wody w funkcji czasu względem wysokości i promienia (wzór nr 2) uwzględniono trzy człony:

$$V = (A + B) * C \quad (2)$$

W założeniu postać funkcji aproksymującej musiała uwzględniać trzy podstawowe podfunkcje:

A – składnik opisujący charakter ruchu wirowego cieczy, skutkiem którego jest jako oddziaływanie siły odśrodkowej, która odpowiedzialna jest za powstawanie charakterystycznej paraboloidy obrotowej na jego swobodnej powierzchni. Przyjęto do rozważań funkcję kwadratową (wzór nr 3).

$$A = ax^2 \quad (3)$$

gdzie:

a – współczynnik funkcji regresji. Jego wartość ma wpływ na pochylenie ramion (wklęsłość) paraboli;

x – zmienna po promieniu zbiornika, $0 < x < 0,32m$

B – składnik opisujący, powstające podczas prowadzenia nalewu i wirowania cieczy, zawirowania wtórne namywające stożek osadowy (rys 2). Zawirowania wtórne mają postać lokalnego wzmocnienia wartości prędkości wirowania cieczy.

Zaproponowano funkcję sinus (wzór nr 4) jako opis naturalnych zaburzeń o charakterystyce zbliżonej do rozchodzenia się fal na powierzchni i w objętości cieczy.

$$B = b * [\sin 2\pi(x - c)] \quad (4)$$

gdzie:

b - współczynnik funkcji regresji, współczynnik amplitudy sinusoidy;

c – współczynnik funkcji regresji opisujący położenie środka wiru.

x – zmienna po promieniu zbiornika, $0 < x < 0,32m$

C – składnik opisujący wyhamowywanie prędkości wirowania cieczy przy ściance zbiornika. Wartość prędkości obwodowej płynu w ograniczonym naczyniu cylindrycznym wzrasta na promieniu osiągając maksimum w pobliżu ścianki naczynia i gwałtownie maleje do zera przy jej powierzchni (w warstwie przyściennej prędkość wirowania równa jest 0 m/s). Aby opisać oddziaływanie ścianki zbiornika posłużono się funkcją o zapisie różnicy jedności i exponenty z wartości ujemnej argumentu (wzór nr 5).

$$C = 1 - \exp^{-d(x-r)} \quad (5)$$

gdzie:

d – współczynniki funkcji regresji opisujący „intensywność” oddziaływania ścianki naczynia;

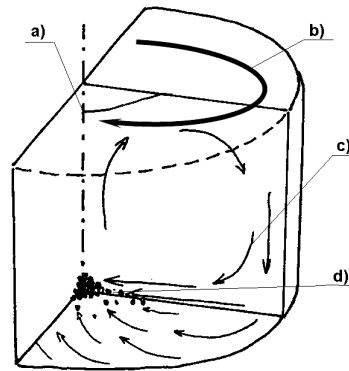
r – promień zbiornika – stała o wartości 0,32 m;

x – zmienna po promieniu zbiornika, $0 < x < 0,32m$

Ostatecznie funkcja przyjęła postać:

$$V = \{ax^2 + [b * \sin 2\pi(x - c)]\} * (1 - \exp^{-d(x-r)}) \quad (6)$$

Funkcję w takiej postaci zapisano jako formułę i wykorzystano do dalszych obliczeń. Wartości współczynników równania regresji (od a do d) były obliczane indywidualnie dla każdego przypadku, a więc dla każdej realizowanej wysokości pomiaru od 0 do 0,32 m (wysokość zbiornika), i każdego czasu pomiaru. Tak więc dla każdego pomiaru wyznaczono funkcję odwzorowania, o różnych wartościach współczynników równania, przy czym ich poszczególne wartości (dla porównywalnych czasów, na danych przekrojach pomiarowych) są do siebie zbliżone.

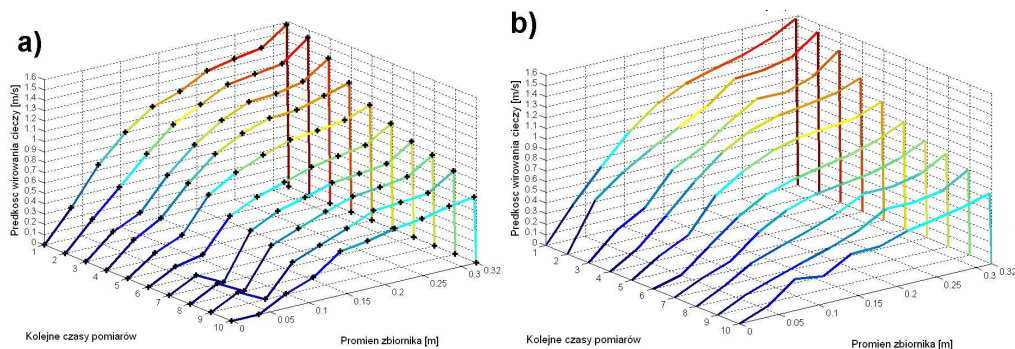


Rys. 2. Występowanie zawirowania wtórnego namywającego stożek osadowy w cieczy klarowanej w kadzi wirowo – osadowej: a) oś zbiornika; b) pierwotna prędkość wirowania (obwodowa); c) zawirowanie wtórne namywające stożek osadowy o prędkości prostopadłej do kierunku wiru pierwotnego; d) centrycznie położony stożek osadowy.

Fig. 2. Occurrence of a secondary whirl silting up a settling cone in a fluid clarifying in a whirling-settling vat: a) container axis; b) primary whirling velocity (circumferential); c) secondary whirl silting up a settling cone with a velocity perpendicular to the direction of a primary whirl; d) centrally situated settling cone.

Wyznaczenie równania regresji

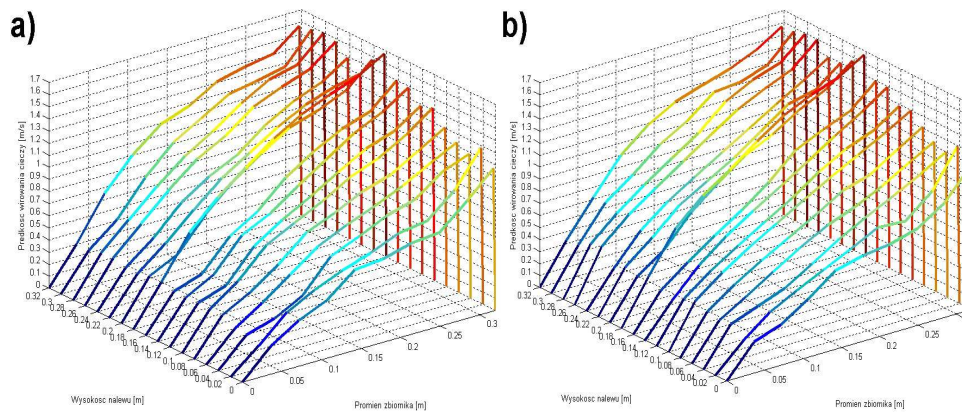
Do analizy i opracowania (dopasowania wyników badań opracowanej teoretycznej funkcji odwzorowania) wykorzystano dodatek Solver arkusza kalkulacyjnego Microsoft Office Excel. Analiza wyników polegała na działaniach optymalizacyjnych poszukiwania wartości minimalnej funkcji celu będącej sumą kwadratów różnicy pomiędzy wartością prędkości wyliczoną z pomierzonego na drodze eksperymentu spiętrzenia wysokości słupa wody, a wartością funkcji aproksymującej dla analizowanej wartości w punkcie pomiarowym.



Rys. 3. Rozkład wartości prędkości cieczy dla kolejnych czasów pomiaru na $\frac{1}{2}$ wysokości zbiornika: a) wyznaczony eksperymentalnie, b) aproksymacja
Fig. 3. Fluid velocity distribution for successive measuring times at a half of container height: a) determined experimentally, b) approximation

Analizę przeprowadzono dla dwóch przypadków. Pierwszy z nich zakładał analizę możliwości wykorzystania wygenerowanej funkcji regresji do opisu rozkładu prędkości ruchu wirowego cieczy na stałej wysokości nalewu dla kolejnych kroków czasowych pomiaru (Rys. 3).

Drugi to analiza możliwości i dokładności odwzorowania wspomnianą funkcją rozkładu wartości prędkości na przekrojach pomiarowych od dna do $\frac{1}{2}$ wysokości słupa wody (nalewu) w zbiorniku w jednym określonym czasie uznanym jako czas początku wirowania (krok czasowy wskazany jako koniec napełniania kadzi wirowo – osadowej - Rys. 4).



Rys. 4. Rozkład wartości prędkości cieczy na wysokościach zbiornika, na jego promieniu, dla chwili czasowej końca nalewu: a) wyznaczony eksperymentalnie, b) aproksymacja

Fig. 4. Fluid velocity distribution at heights of a container, at its radius for a final instant of charging: a) determined experimentally, b) approximation

Wnioski

Postać funkcji jest możliwa do zapisu w języku programowania właściwym dla pakietu symulacyjnego ANSYS jako wymuszenie dla zerowego kroku symulacji

Zaproponowana funkcja w zadawalającym stopniu odwzorowują rzeczywisty rozkład prędkości cieczy wypełniającej zbiornik kadzi wirowo – osadowej aproksymując wyniki pomiarów. Rozrzut wyników pomiaru i aproksymacji nie przekracza 10 procent.

Funkcja regresji uwzględnia złożoność procesu ruchu wirowego cieczy wynikającą z tworzenia się lokalnie i chwilowo wtórnych zawirowań o osi obrotu prostopadłej do osi głównego wiru napędowego.

Literatura

Diakun J., Jakubowski M.: Symulacja ruchu wirowego cieczy w kadzi wirowo – osadowej, Inżynieria Rolnicza 5(60), IX Konferencja Naukowo-Techniczna Budowa i Eksploatacja Maszyn Przemysłu Spożywczego BEMS 2004, Koszalin – Darłówko 21 - 24.08.2004

Jakubowski M.: 2003, Possobilites of use of DPIV for visualization of liquid rotational movement in rotational ladle, Modern Techniques and Technologies, Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, nr 33

Troskolański A. T. 1969, Hydromechanika, WNT, Warszawa

Analyses of measuring the velocity of fluid rotating in whirling-settling vat

Summary

The paper presents analyses of measuring the velocity of the fluid rotating in a whirling-settling vat. Tests were carried out in a laboratory whirling-settling vat which diameter is $D = 0.64$ m and max discharge head is $H_{max} = 0.92$ m. Measurements of hydrodynamic pressure were taken using Pitot comb specially adopted for this purpose. Experimental results were approximated determining the fluid velocity field distribution in the vat. Analyses were carried out using a SOLVER add-on card to an EXCEL spreadsheet.

Keywords: whirling-settling vat, regression function, initial velocity, velocity distribution