

## WPŁYW CZASU I PRĘDKOŚCI PRZEPLYWU CIECZY MYJĄCEJ NA SKUTECZNOŚĆ MYCIA PŁYTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA\*

*Joanna Piepiórka-Stepuk, Jarosław Diakun*  
*Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska*

**Streszczenie.** W pracy podjęto próbę wyprowadzenia funkcji stopnia umycia płyt wymiennika ciepła w funkcji czasu i średniej obliczeniowej prędkości przepływu w szczelinie między płytami. Funkcję tą zaproponowano na podstawie analizy i aproksymacji wyników badań doświadczalnych. Z przeprowadzonych badań wynika, że proces mycia można opisać równaniem różniczkowym, pierwszorzędowym, którego rozwiązaniem jest funkcja wykładnicza asymptotyczna. Zaproponowana funkcja, przyjmuje postać, w której zarówno kąt nachylenia jak i asymptota zależą od prędkości przepływu.

**Słowa kluczowe:** mycie w systemie CIP, płytowy wymiennik ciepła

### Wstęp

Od 1940 roku, czyli od skonstruowania pierwszej pionierskiej instalacji mycia CIP, metoda mycia w przepływie cieszy się ogromnym uznaniem i zainteresowaniem w różnych branżach przemysłu spożywczego, głównie mleczarskim. Ideą systemu CIP była oszczędność związana z czasem mycia ręcznego oraz koniecznością demontażu i ponownego montażu instalacji. Szybko postępujący rozwój sprawił, że systemy mycia w przepływie stały się niezastąpione w utrzymaniu higieny rurociągów oraz urządzeń przepływowych. Obecnie, nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne oraz automatyzacja procesu umożliwiają wykorzystanie stacji CIP do mycia wielu różnych urządzeń produkcyjnych z dużą skutecznością i łatwością w obsłudze [Gillham i in. 2000; Dresch i in. 2001].

Mycie metodą CIP realizowane jest w kilku etapach, które decydują o skuteczności całego procesu. W każdym z tych etapów, w różnym stopniu oddziałują czynniki mycia tj.: czas trwania procesu mycia, temperatura cieczy myjącej, chemiczne środki myjące i ich stężenie oraz czynniki mechaniczne, jako oddziaływania cieczy na ścianki mytych ele-

---

\* *Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2011 jako projekt badawczy nr N N313 147038*

mentów oraz lokalne naprężenia ścinające [Blel i in. 2007; Grasshoff 1992; Lelievre i in. 2002a; Lelievre i in. 2003; Jensen i in. 2005]. Optymalne zestawienie powyższych czynników w program mycia zapewnia skuteczność procesu, jednak nie jest to proste gdyż wymaga znajomości mechanizmu ich oddziaływania.

## Cel i zakres analiz

Celem podjętej pracy jest opis wyników badań za pomocą funkcji korelacyjnej, przedstawiającej stopień umycia w przepływie płytowego wymiennika ciepła, w funkcji czasu i średniej obliczeniowej prędkości przepływu w szczelinie między płytami.

## Metodyka i zakres badań

W badaniach eksperymentalnych [Piepiórka, Diakun 2011], określono wpływ czasu ( $t$ ), temperatury ( $T$ ) i średniej prędkości przepływu w przestrzeni między płytami ( $u$ ) jako czynników mycia, na stopień czystości płyt wymienników ciepła ( $J_M$ ) mytych w przepływie.

Wartości zmiennych wejściowych eksperymentu wynosiły odpowiednio:

- ( $t$ ) czas procesu mycia [min]: 10; 32; 65; 98; 120;
- ( $T$ ) temperatura medium myjącego [ $^{\circ}\text{C}$ ]: 10; 24; 45; 66; 80;
- ( $u$ ) średnia obliczeniowa prędkość przepływu w przestrzeni między płytami [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]: 0,35; 0,45; 0,55; 0,65; 0,75.

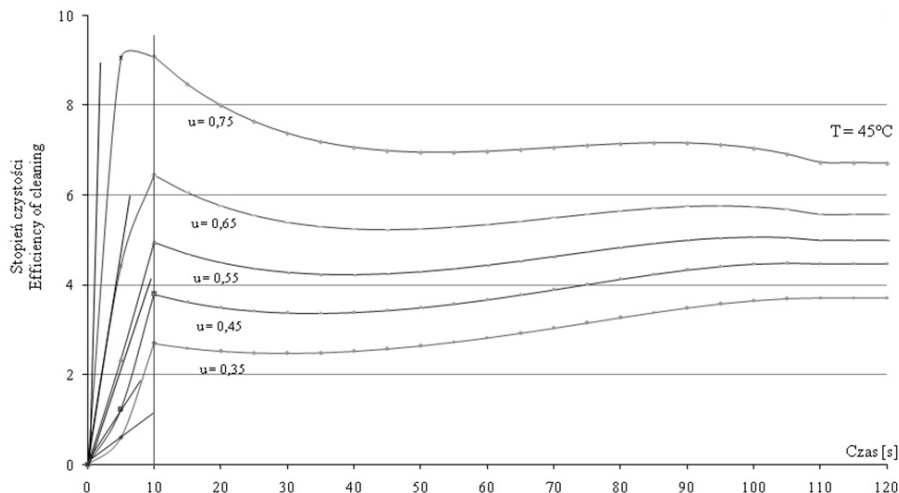
Stopień umycia oceniano metodą testów ProTect i wyrażono w skali od 0 do 10 punktów czystości [Piepiórka, Diakun 2011]. Pełny program badań uwzględniający wszystkie kombinacje przyjętych wartości czynników obejmowałby 125 pomiarów. Niepełny program badań opracowano i przeprowadzono w oparciu o teorię eksperymentu planowanego, według kompozycyjnego ortogonalnego pięciopozomowego planu rotalnego, PS/DK- $\lambda$ , wykorzystując do tego celu program statystyczny Experiment Planner 1.0 [Kukielka 2002]. Program obejmował 20 pomiarów. Badania dla poszczególnych zestawów czynników powtarzano trzykrotnie.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych w pierwszym etapie standardowo zastosowano korelacyjną funkcję opisującą skuteczność mycia płyt wymienników ciepła ( $J_M = f(t, T, u)$ ).

$$J_M = -4,859 + 0,024t + 0,091T + 18,324u - 0,001tT - 0,0713tu - 0,087Tu + \\ + 0,0003t^2 - 0,001T^2 - 21,35u^2 + 0,001tTu - 1,57 \cdot 10^{-6}t^3 + 3,58 \cdot 10^{-6}T^3 + 12,96u^3$$

Współczynnik korelacji dla zakresu, w którym prowadzono badania wynosił  $R = 0,9902$ .

Powyższa funkcja daje możliwość sporządzenia przebiegów funkcji cząstkowych charakteryzujących proces mycia. Na jej podstawie sporządzono przebieg funkcji stopnia umycia płyt wymiennika ciepła w zależności od czasu i różnych prędkości przepływu w szczelinie między płytami dla stałej temperatury  $T=45^{\circ}\text{C}$  (rys. 1).



Rys. 1. Wpływ czasu i prędkości przepływu na skuteczność mycia  
 Fig. 1. Impact of time and the flow speed on the efficiency of cleaning

Uzyskano charakterystyczne przebiegi zmienności stopnia umycia w czasie. W początkowym okresie obserwuje się szybki przyrost stopnia umycia. Jest to związane z wmywaniem zanieczyszczeń słabo związanych z powierzchnią. Po tym okresie następuje zahamowanie przyrostu jakości mycia. Poziom uzyskanego stopnia umycia oraz intensywność początkowego przyrostu zależą od prędkości. Im większa prędkość tym wyższy poziom jakości mycia. Przyjęta postać funkcji aproksymacyjnej wprowadza pewne nielogiczności. Mianowicie pojawia się maksimum czystości a w czasie dalszego mycia, jakość mycia spada. Ta nielogiczność wynika z przyjętej aproksymacji funkcji trzeciego stopnia. Oznacza to, że ta funkcja nie jest odpowiednia do opisu badanego procesu.

Kinetykę jakości mycia w czasie można traktować jako funkcję pierwszorzędową. Opisuje ona procesy, w których przyrost funkcji jest proporcjonalny do stopnia nie uzyskania docelowego zadawalającego stanu („im jest gorzej, tym jest łatwiej”). Funkcja zapisywana jest w postaci równania różniczkowego [Serwiński 1982]:

$$\frac{dx}{dt} = k(1 - x) \quad (1)$$

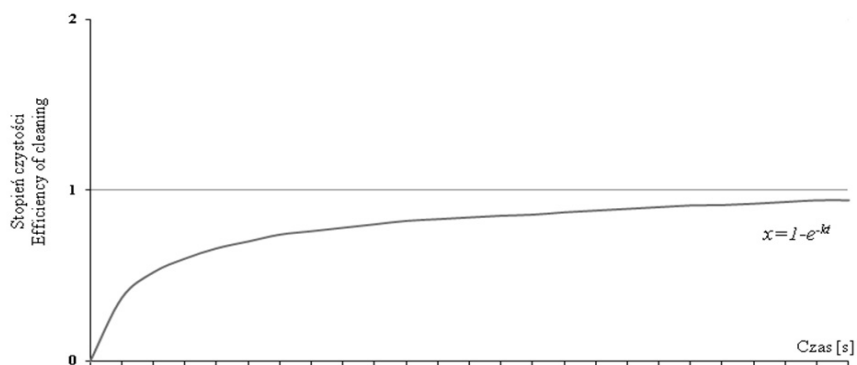
gdzie:

- $x$  – analizowana wielkość procesowa w czasie  $t$  (standardowo przyjmuje wartości w zakresie od 0 do 1);
- $k$  – współczynnik intensywności procesu (stała czasowa).

Rozwiązaniem tego równania jest funkcja kinetyki procesu (zmienna w czasie) wyrażona wzorem:

$$x = 1 - e^{-kt} \quad (2)$$

W postaci standardowej przykład przebiegu kinetyki procesu funkcji pierwszorzędowej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Standardowa postać funkcji pierwszorzędowej  
Fig. 2. A standard form of the primary function

Kinetyka procesu mycia może mieć postać funkcji pierwszorzędowej ponieważ charakter procesu jest taki, że łatwo uzyskuje się przyrost jakości mycia dla dużego zabrudzenia, natomiast wraz ze wzrostem czystości dalsza poprawa jest trudna. Taki ogólny trend zauważyć można również na przebiegach funkcji jakości mycia – rys. 1.

W standardowej postaci kinetyki funkcji pierwszorzędowej poziom  $x=1$  jest asymptotą (wartością graniczną). Z badań wynika, że graniczna wartość uzyskanego stopnia mycia zależy od prędkości przepływającego medium myjącego. W związku z tym zaproponowano modyfikację kinetyki wg funkcji pierwszorzędowej do opisu procesu mycia w postaci:

$$J_m = J_{gr} \cdot (1 - e^{-k_m t}) \quad (3)$$

gdzie:

$J_{gr} = f(u)$  – graniczna wartość umycia jako funkcja prędkości, (wyznacza poziom asymptoty);

$K_m = f(u)$  – współczynnik intensywności mycia jako funkcja prędkości.

Powyższa funkcja powinna poprawnie opisywać przebieg procesu mycia w czasie z uwzględnieniem oddziaływania prędkości czynnika myjącego. Wyznaczenie współczynników równania kinetyki mycia wymaga zaplanowania dodatkowych pomiarów.

## Wnioski

1. Wraz ze wzrostem prędkości przepływu czynnika myjącego między płytami wymiennika ciepła wzrasta stopień czystości ich powierzchni.
2. Najwięcej zanieczyszczeń usuwanych jest w pierwszych minutach procesu.
3. Wydłużenie czasu mycia nie poprawia stopnia czystości.
4. Z przeprowadzonej analizy mechanizmu oddziaływania medium myjącego w czasie oraz funkcji aproksymacyjnej i wyników badań eksperymentalnych, wynika, że stopień czystości powierzchni płyt wymiennika ciepła w czasie ma charakter funkcji pierwszorzędowej.
5. Do opisu kinetyki mycia zaproponowano zmodyfikowaną postać funkcji pierwszorzędowej uwzględniającej ograniczony stopień umycia i intensywność mycia w zależności od prędkości medium myjącego.
6. W celu wyznaczenia współczynników wyprowadzonej funkcji należy kontynuować badania.

## Bibliografia

- Blel W., Benezech T., Legentilhomme P., Legrand J., Le Gentil-Lelievre C.** (2007): Effect of flow arrangement on the removal of Bacillus spores from stainless steel equipment surfaces during a Cleaning In Place procedure, *Chemical Engineering Science* 62, 3798-3808.
- Dresch M., Daufin G., Chaufer B.** (2001): Integrated membrane regeneration process for dairy cleaning-in-place, *Separation and Purification Technology*, 22-23, 181-191.
- Gillham C.R., Fryer P.J., Hasting A.P.M., Wilson D.I.** (2000): Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows, *Journal of Food Engineering*, 46, 199-209.
- Grasshoff, A.** (1992): Hygienic design: the basis for computer controlled automation. *Food and Bioproducts Processing, Transactions of The Institution of Chemical Engineers Part C*, 70, 69-77.
- Jensen, B.B.B., Friis, A., Bénézech, T., Legentilhomme, P., Lelièvre, C.** (2005): Local wall shear stress variations predicted by computational fluid dynamics for hygienic design. *Food and Bioproducts Processing, Transactions of The Institution of Chemical Engineers Part C*, 83(1), 1-8;
- Lelieveld H. i in.** (2003): *Higiene in food processing*, Woodhead publishing limited, England, 197-230.
- Lelievre C., Legentilhomme P., Gaucher C., Legrand J., Faille, C., Bénézech, T.** (2002a): Cleaning in place: effect of local wall shear stress variation on bacterial removal from stainless steel equipment. *Chemical Engineering Science*, 57(8), 1287-1297.
- Piepiórka J., Diakun J.** (2011): Nierównomierność mycia powierzchni płyt wymienników ciepła, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 1, 33-34.
- Serwiński M.** (1982): *Zasady Inżynierii Chemicznej i Procesowej*, WNT Warszawa, ISBN 832040309X.

## **INFLUENCE OF TIME AND THE CLEANING LIQUID FLOW VELOCITY ON THE EFFECTIVENESS OF CLEANING THE PLATE HEAT EXCHANGER**

**Abstract.** The study presents the attempt to introduce the function of the degree of cleaning the plate heat exchanger as a function of time and average computational velocity between the heat plates. This function was suggested based on the analysis and approximation of experimental results. The research has shown that the cleaning process can be described by differential primary equation, the solution of which is a asymptotic exponential function. The suggested function assumes the form, in which both the tilt angle and the asymptote depend on the flow velocity.

**Key words:** cleaning in CIP system, plate heat exchanger

**Adres do korespondencji:**

Joanna Piepiórka-Stepuk; e-mail: joanna.piepiorka@tu.koszalin.pl  
Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego  
Politechnika Koszalińska  
ul. Raławicka 15-17  
75-620 Koszalin