

Leszek Rudniak, Włodzimierz Możaryn

Wykorzystanie komputerowej symulacji procesów przepływowych (CFD) w projektowaniu urządzeń do uzdatniania wody

Możliwości wykorzystania metody CFD (*Computational Fluid Dynamics*) w technologii oczyszczania wody są bardzo szerokie. Metoda ta umożliwia analizowanie najczęściej stosowanych procesów, takich jak napowietrzanie, koagulacja, sedimentacja, flotacja, filtracja, dezynfekcja, a nawet infiltracja.

Tradycyjne podejście stosowane w badaniach jednostkowych procesów oczyszczania wody było i jest powiązane z wykorzystaniem wizualizacji przepływu wody i wykorzystaniem odpowiednich modeli skalowania na podstawie danych uzyskanych w warunkach laboratoryjnych. Poważną wadą takiego podejścia są względnie wysokie koszty oraz długi czas niezbędny do zgromadzenia odpowiednich danych. Metoda CFD pozwala na komputerową symulację zjawisk transportu pędu, energii oraz masy w przepływowych układach rzeczywistych. W stosunkowo prosty sposób i względnie szybko uzyskuje się dokładne dane na temat przebiegu danego procesu w skali technicznej. Metoda ta szczególnie dobrze sprawdza się przy analizie wadliwie działających układów, w celu określenia sposobu ich modernizacji, a także podczas wielowariantowego projektowania nowych rozwiązań.

Na początku lat 90. metoda CFD była stosowana jedynie przez nielicznych specjalistów w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym, wykorzystujących do symulacji procesów duże centra obliczeniowe. Dzięki postępowi, jaki dokonał się w przemyśle elektronicznym, obliczenia symulacyjne mogą być obecnie prowadzone także przy użyciu komputerów osobistych. Spowodowało to w ostatniej dekadzie burzliwy rozwój metody CFD w wielu zastosowaniach przemysłowych, w tym także w technologii oczyszczania wody. Należy podkreślić, że firmy oferujące oprogramowanie CFD uczyniły wiele, aby było ono bardzo przyjazne dla użytkownika.

Podstawowe równania modeli CFD

Programy wykorzystujące metodę CFD pozwalają uzyskać niezbędne informacje o przepływie płynu (rozkład pola prędkości, pole ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury) i masy (stężenia substancji rozpuszczonych w wodzie, w tym reakcje chemiczne). Osiąga się to poprzez numeryczne rozwiązanie równań opisujących wymianę pędu, bilansu energii i masy. W przenoszeniu pędu oraz ciepła i masy występują trzy wspólne mechanizmy transportu w czasoprzestrzeni, tj. akumulacja,

konwekcja i dyfuzja. Szybkości zmian według tych mechanizmów są przedstawiane w ujęciu Eulera w postaci równania transportu:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{v}\phi) - \text{div}(\Gamma\nabla\phi) = S_\phi \quad (1)$$

Równanie (1) zawiera źródła i upusty bilansowanej wielkości ϕ . Zmienna ϕ jest ogólna, oznacza odpowiednio składową wektora prędkości w wypadku przenoszenia pędu w wybranym kierunku, temperaturę w wypadku bilansu entalpii lub stężenie zanieczyszczenia w wypadku bilansu masy. Współczynnik Γ opisuje intensywność transportu molekularnego i dotyczy lepkości, przewodzenia ciepła czy dyfuzji – odpowiednio dla bilansu pędu, ciepła i masy. Należy podkreślić, że równanie (1) zostało wyprowadzone dla jednofazowego przepływu laminarnego płynu niutonowskiego. Istnieje również możliwość włączenia różnorodnych modeli burzliwości, począwszy od jedno-, dwu- (model k- ϵ) i dziewięcioparametrowych, kończąc na modelach typu LES (*Large Eddy Simulation*), co pozwala analizować zjawiska w znacznie bardziej interesującym dla zastosowań praktycznych zakresie przepływu.

Opracowane modele dla ośrodków wielofazowych mogą być również wykorzystane w metodzie CFD, dzięki czemu możliwa jest symulacja numeryczna takich procesów, jak napowietrzanie, ozonowanie, flotacja i sedimentacja cząstek stałych. Dostępnych jest kilka metod numerycznych, które umożliwiają rozwiązanie równania (1). Do najczęściej stosowanych metod należą metoda elementu skończonego [1] oraz metoda objętości skończonej [2]. Każda z tych metod posiada zalety, jak również pewne ograniczenia, w zależności od klasy analizowanych zagadnień.

Przykładem gotowych pakietów CFD są między innymi programy firmy FLUENT Inc., wykorzystujące obie wymienione metody tak, aby użytkownik miał możliwość analizy jak najszerszej grupy zagadnień. Są to następujące programy [3]:

- FLUENT: metoda objętości skończonej, siatka niestrukturalna, płyny ściśliwe i nieściśliwe, przepływy poddźwiękowe i naddźwiękowe,
- FIDAP: metoda elementu skończonego, siatka niestrukturalna, płyny ściśliwe i nieściśliwe, przepływy poddźwiękowe.

Obecnie użytkownikami tego oprogramowania są nie tylko naukowcy z ośrodków badawczych i uczelni, czy projektanci urządzeń przepływowych, ale także inżynierowie, którzy w swojej praktyce zawodowej mają styczność z problematyką przepływów płynów.

Rozwiązanie równania (1), stosowanego do modelowania procesów przenoszenia pędu, ciepła i masy, wymaga sformułowania właściwych warunków jednoznaczności problemu.

Dr inż. L. Rudniak: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Chemicznej i Procesowej, ul. L. Waryńskiego 1, 00-645 Warszawa

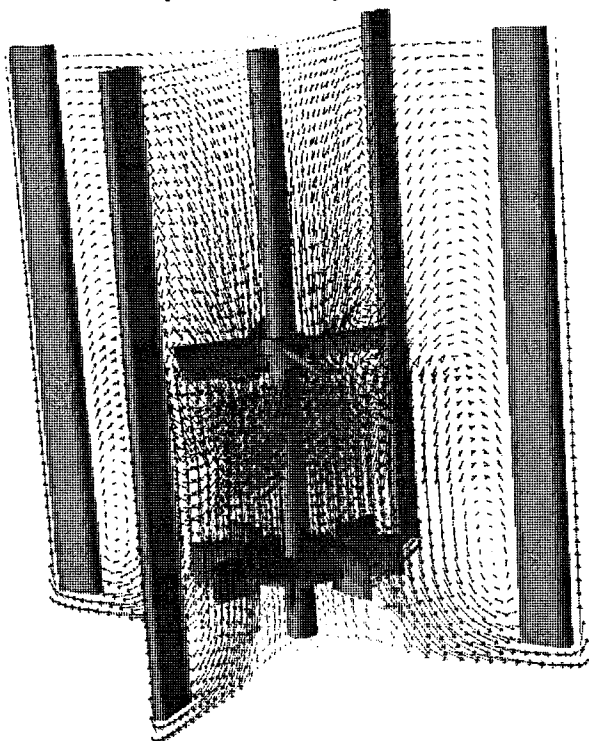
Dr inż. W. Możaryn: Zakład Techniki Basenowych ELIMP, Mitex SA Oddział Warszawa, ul. Cybernetyki 13, 02-677 Warszawa

Pierwszą decyzją jest wybór geometrii, a następnie wybierany jest rodzaj stosowanych modeli szczegółowych. Można wtedy podjąć decyzję, który proces będzie symulowany numerycznie. Konieczne jest również uwzględnienie odpowiednich warunków granicznych (brzegowe, początkowe) dla wybranych zmiennych. Następnie należy zdefiniować właściwości fizyczne płynu wraz z odpowiednimi równaniami stanu, a także parametry modeli szczegółowych.

Dla dokładnie zdefiniowanego zagadnienia (często jest to dość złożony proces) prowadzi się komputerową symulację przez rozwiązanie numeryczne (programy automatyzują ten etap) układu równań różniczkowych cząstkowych drugiego rzędu (1). Efektem są informacje o polu prędkości, ciśnienia i innych poszukiwanych parametrach układu (np. temperatura, stężenie) w postaci liczbowej. Programy CFD pozwalają w prosty sposób zobrazować wyniki graficznie, dzięki czemu analiza jest bardzo ułatwiona.

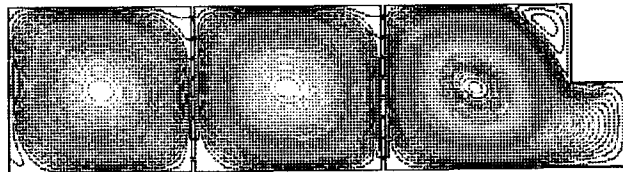
Zastosowanie metody CFD w procesach oczyszczania wody

W procesie koagulacji objętościowej w pierwszym etapie do wody wprowadzany jest koagulant. Proces ten realizuje się w komorach szybkiego mieszania, będących często mieszaczami mechanicznymi z mieszadłami łopatkowymi. Długie i intensywne mieszanie może spowodować zniszczenie kłaczków oraz częściową desorpcję zatrzymanych zanieczyszczeń, natomiast zbyt wolne mieszanie może spowodować zarówno niedokładne wymieszanie koagulantu z wodą, jak i sedimentację kłaczków już w komorze szybkiego mieszania. Dzięki zastosowaniu techniki CFD poprawiono działanie mieszacza, dokonując zmian zarówno w konstrukcji wału jak i mieszadeł. Poprawiono efektywność mieszania i charakterystykę czasu przebywania wody w mieszaczu. Zaletą zastosowanej techniki było znaczne skrócenie etapu badań, przy stosunkowo niskich kosztach całego przedsięwzięcia. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe pole prędkości w zmodernizowanym mieszaczu szybkim [4].



Rys. 1. Pole prędkości zawieszin w mieszaczu łopatkowym [4]

Skuteczność procesu flokulacji zależy głównie od czasu i gradientu prędkości ruchu cieczy. W danym zakresie przepływu niezmiernie ważny jest odpowiedni dobór geometrii komory flokulacji. W końcowym efekcie rozwiązanie musi prowadzić do dobrego (równomiernego) wymieszania w komorze, przy odpowiednio długim czasie przetrzymania. Zastosowanie programu FIDAP umożliwiło przeprowadzenie krytycznej analizy hydrodynamiki istniejącej komory i zmian konstrukcyjnych, pozwalających na zwiększenie efektywności procesu flokulacji. Na rysunku 2 przedstawiono tory cząstek przemieszczających się zawieszin w zmodyfikowanej komorze flokulacji. Własne doświadczenia dotyczące komputerowej symulacji zjawisk hydraulicznych zachodzących w mieszaczach wolnych opisano w pracy [5].



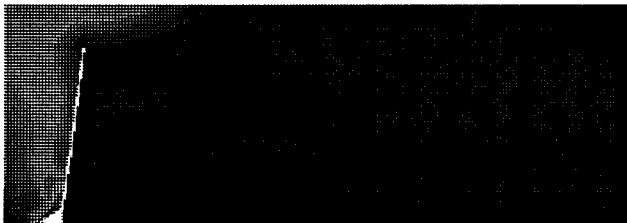
Rys. 2. Tory cząstek zawieszin w komorze flokulacji, obliczone z numerycznej symulacji [4]

Ważnymi czynnikami wpływającymi na efektywność dezynfekcji wody chlorem jest dawka chloru i czas kontaktu wody z chlorem. Istniejące ograniczenia w dostępności gruntu, ograniczone środki finansowe oraz regulacje prawne często zmuszają projektantów do zmniejszania rozmiarów geometrycznych komór kontaktowych, przy jednoczesnym zachowaniu wydajności procesu dezynfekcji. Przykład wykorzystania programu CFD do wyznaczenia czasu przebywania wody w komorze kontaktowej podano na rysunku 3. Uzyskane w symulacjach numerycznych wyniki porównano z danymi doświadczalnymi. Rozbieżność w stosunku do wartości uzyskanych z programu FLUENT była poniżej 5%.



Rys. 3. Tory cząstek wody przemieszczającej się w komorze kontaktowej wody z chlorem [4]

Proces flotacji, stosowany do usuwania zawieszin obecnych w wodzie w wypadku, kiedy różnica gęstości zawieszin i wody jest niewielka, wymaga stosowania czynnika wspomagającego, który łącząc się z usuwanymi zawieszinami tworzy aglomeraty o gęstości umożliwiającej unoszenie. Czynnikiem tym są mikropęcherzyki powietrza. Dokładna znajomość hydrodynamiki dwufazowego przepływu woda–powietrze w komorze flotacji jest czynnikiem kluczowym w optymalnym ich



Rys. 4. Stężenie powietrza (ułamek objętościowy) w zawieszinach, obliczone z numerycznej symulacji hydrodynamiki komory flotacji [4]



Rys. 5. Pole prędkości fazy ciekłej (m/s), obliczone z numerycznej symulacji hydrodynamiki komory flotacji [4]

projektowaniu. W łatwy sposób, dla różnych obciążeń urządzenia, można poddać analizie takie parametry, jak stosunek objętości wody do powietrza, czy stosunek strumienia wody wysyczonej powietrzem do strumienia przepływającej wody w komorze. Na rysunku 4 podano wartości wyznaczone z numerycznej symulacji stężenia powietrza, a na rysunku 5 zobrazowano obliczone pole prędkości w komorze flotacji.

Podsumowanie

Programy wykorzystujące metodę CFD, to obecnie dojrzałe, wydajne i efektywne narzędzia do analizy zagadnień związanych z procesami przepływowymi. Postęp w metodach numerycznych oraz przemysłe elektroniczne sprawił, że mogą być one szeroko stosowane przez inżynierów i projektantów w dziedzinie oczyszczania wody.

Przedstawione w niniejszej pracy wybrane przykłady zastosowania metody CFD w technologii oczyszczania wody dowodzą ich przydatności także w bardzo złożonych procesach.

LITERATURA

1. M. GRESHO, R. SANI: Incompressible Flow and the Finite Element Method. John Willey & Sons, New York 1998.
2. J. FERZIGER, M. PERIC: Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin 1999.
3. Dokumentacja programów FLUENT i FIDAP. Fluent Inc., 1998.
4. Materiały firmy Fluent Inc.
5. W. MOŻARYN, L. RUDNIAK, K. MATUSZEWSKI: Wykorzystanie techniki CAD/CFD do analizy i modelowania hydrodynamiki mieszaczy wolnych na przykładzie stacji uzdatniania wody Podolszyce w Płocku. Ochrona Środowiska, 1997, nr 4(67), ss. 69–72.

Numerical Simulation of Fluid Flow (CFD Method) as a Useful Tool in the Design of Water Treatment Devices

Numerical simulation of fluid flow can be widely used in water treatment processes. The uses where numerical simulation of fluid flow (CFD method) is applicable are reviewed. CFD software provides the users with information about fluid flow (velocity profile, pressure profile), heat transfer (temperature

profile) and mass transfer (pollutants, chemical reactions, concentration profiles) in real water treatment systems by numerical solution of the momentum, energy and mass equations. The CFD method is very useful in the analysis of fluid flow machineries, in troubleshooting and parametric studies.