

Review of modern methods of modeling the sedimentation process of non-granular suspensions

Przegląd współczesnych metod modelowania procesu sedymentacji zawiesin nieziarnistych



DOI: 10.15199/62.2025.1.13

A review, with 17 refs., of techniques for detg. particle size and shape using modern tools such as scanning electron microscopy (SEM) and laser diffraction, with an emphasis on their role in characterizing irregular particles. Contemporary sedimentation models based on advanced numerical techniques such as discrete element methods (DEM), smoothed particle hydrodynamics (SPH) and fractal geometry models were presented, which take into account particle interactions, complex particle morphol. and the behavior of high-concn. suspensions under varying conditions. The benefits of integrating numerical and exptl. methods were discussed, increasing the precision and applicability of these models, contributing to the optimization of industrial sedimentation processes.

Keywords: methods of modeling, sedimentation process, non-granular suspensions

Przedstawiono przegląd aktualnych metod i modeli opisujących proces sedymentacji zawiesin nieziarnistych. W części wstępnej omówiono techniki określania rozmiaru i kształtu cząstek, obejmujące zarówno klasyczne podejścia, takie jak analiza sitowa, jak i nowoczesne metody, w tym mikroskopię elektronową skaningową (SEM) oraz dyfrakcję laserową. Techniki te odgrywają istotną rolę w charakteryzowaniu nieregularnych cząstek i dostarczają kluczowych danych wejściowych dla modeli sedymentacyjnych. Główny nacisk położono na współczesne modele sedymentacji, począwszy od klasycznych modeli opartych na prawie Stokesa, po zaawansowane techniki numeryczne, takie jak metoda elementów dyskretnych (DEM), hydrodynamika cząstek gładkich (SPH) oraz modele oparte na geometrii fraktalnej. Modele te uwzględniają interakcje między cząstkami, ich złożoną morfologię oraz zachowanie zawiesin o dużym stężeniu w zmiennych warunkach procesowych. Integracja metod numerycznych i eksperymentalnych pozwala na zwiększenie precyzji i zastosowalności modeli, wspierając optymalizację procesów sedymentacyjnych w takich obszarach, jak uzdatnianie wody, oczyszczanie ścieków oraz separacja materiałów.

Słowa kluczowe: metody modelowania, proces sedymentacji, zawiesiny nieziarniste

Procesy rozdzielania układów wielofazowych znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle, obejmując takie branże, jak chemiczna, farmaceutyczna, spożywcza oraz gospodarkę wodno-ściekową. W tych dziedzinach kluczowe jest osiągnięcie jak najwyższej wydajności przy jednoczesnym minimalizowaniu kosztów operacyjnych. W związku z tym proces

sedymentacji, który wykorzystuje siłę grawitacji do separacji faz (oczyszczania lub zagęszczania), stanowi korzystne rozwiązanie zarówno pod względem technologicznym, jak i ekonomicznym.

Efektywność procesu sedymentacji może być oceniana za pomocą różnorodnych metod, począwszy od badań laboratoryjnych¹⁾ (testy sedymentacyjne, modele osadników), przez eksperymenty w skali półtechnicznej i na rzeczywistych obiektach, aż po modelowanie i symulacje numeryczne²⁾. Wyniki tych badań pozwalają na opracowanie modeli matematycznych i empirycznych, które umożliwiają szczegółowy opis zachodzących zjawisk oraz ich zastosowanie w optymalizacji procesów przemysłowych.

Początkowo opracowywane modele skupiały się na opisie procesu sedymentacji pojedynczych lub niewielkiej liczby cząstek. Przykładem jest klasyczny model stokesowski, który pozwala na przewidywanie prędkości opadania cząstki w płynie, uwzględniając jej rozmiar, kształt oraz właściwości ośrodka, co znajduje potwierdzenie w badaniach dotyczących



Dr inż. Tymoteusz TURLEJ (ORCID: 0000-0002-6565-4203) w roku 2011 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie. Jest adiunktem w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska na tym samym wydziale. Zajmuje się układami wielofazowymi (sedymentacja), charakterystyką wielkości i kształtów cząstek (dyfraktometria laserowa, mikroskopia optyczna). Specjalność – inżynieria mechaniczna.

*** Adres do korespondencji:**

Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel.: (12) 617-31-00, e-mail: turlej@agh.edu.pl

osiadania cząstek o różnej wielkości w zawiesinach. Autorzy tego modelu uwzględnili m.in. wpływ koncentracji cząstek, ich swobodnych prędkości opadania oraz właściwości cieczy na zachowanie się zawiesiny w warunkach przepływu laminarnego³. W nowszych badaniach eksperymentalnych i numerycznych opisano sedymentację małych cząstek w komórkowym polu przepływu, wykazując, że przy bardzo małych liczbach Stokesa prędkość cząstek jest sumą prędkości stokesowskiej i lokalnej prędkości cieczy, a przy większych liczbach Stokesa opór staje się nieliniowy i może być opisany korelacjami, takimi jak równanie Schillera i Naumanna⁴.

Klasyczne modele sedymentacyjne, takie jak model Stokesa, mają istotne ograniczenia wynikające z uproszczonych założeń. Zakładają one kulisty kształt cząstek, co jest adekwatne dla prostych układów ziarnistych, ale nie odzwierciedla rzeczywistych układów zawierających cząstki o nieregularnych i złożonych kształtach, takich jak flokule i agregaty. Modele te nie uwzględniają również geometrii fraktalnej, która jest kluczowa dla opisu struktury cząstek nieziarnistych, co prowadzi do niedokładności w przewidywaniu dynamiki osiadania oraz rozkładu gęstości objętościowej w zawiesinach.

W miarę rozwoju technologii obliczeniowych powstały zaawansowane modele uwzględniające zarówno sedymentację swobodną, w której zachowanie grup cząstek obejmuje ich wzajemne interakcje, jak i sedymentację skrępowaną, charakterystyczną dla zawiesin o większych stężeniach⁵. Klasyczne modele traktowały cząstki jako idealnie kuliste, co wynikało z ograniczonych możliwości obliczeniowych, jednak współczesne metody numeryczne, takie jak metody elementów dyskretnych (DEM)⁶ i dynamiczna symulacja cząstek (DPM)⁷, pozwalają na bardziej realistyczne analizy. Uwzględniają one nieregularne kształty cząstek, zmienne warunki przepływu oraz interakcje międzyfazowe, co znacząco zwiększa ich dokładność i zastosowanie w warunkach przemysłowych.

Pomimo licznych zalet, takich jak precyzja odwzorowania dynamiki osiadania i możliwość analizy złożonych układów wielofazowych, metody numeryczne mają również swoje ograniczenia. Należą do nich wysokie wymagania obliczeniowe, które wydłużają czas symulacji, szczególnie dla dużych systemów, oraz konieczność precyzyjnej kalibracji parametrów wejściowych. Te czynniki mogą ograniczać praktyczne zastosowanie metod, takich jak DEM i DPM w dużych projektach przemysłowych, mimo ich potencjału w optymalizacji i poprawie efektywności procesów sedymentacyjnych.

Obecnie wiele zespołów badawczych koncentruje się na opracowaniu modeli opisujących procesy sedymentacji cząstek nieziarnistych o nieregularnych kształtach, które lepiej odzwierciedlają rzeczywiste układy⁸. W kontekście analizy procesów sedymentacji cząstek nieziarnistych precyzyjne określenie rozmiaru i kształtu cząstek jest kluczowe⁹. Do tego celu stosuje się różnorodne metody, z których każda ma swoje zalety i ograniczenia.

Precyzyjna charakterystyka rozmiaru i kształtu cząstek jest kluczowa w wielu dziedzinach nauki i przemysłu, takich jak inżynieria materiałowa, farmacja i ochrona środowiska (np. gospodarka wodno-ściekowa). Współczesne metody analizy cząstek obejmują zarówno techniki klasyczne, jak i zaawansowane metody instrumentalne, z których każda ma specyficzne zalety i ograniczenia¹⁰.

Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) umożliwia uzyskanie wysokorozdzielczych obrazów powierzchni cząstek, co pozwala na szczegółową analizę ich morfologii. Technika ta jest szczególnie cenna przy badaniu cząstek o nieregularnych kształtach i rozmiarach w zakresie od nanometrów do mikrometrów. Jednakże przygotowanie próbek do SEM jest czasochłonne, a sama analiza wymaga kosztownego sprzętu oraz odpowiednich warunków laboratoryjnych¹¹.

Dyfrakcja laserowa jest powszechnie stosowaną metodą do określania rozkładu wielkości cząstek w zakresie od kilkuset nanometrów do kilku milimetrów. Technika ta opiera się na analizie wzoru dyfrakcyjnego światła laserowego rozpraszanego przez zawiesinę cząstek. Zaletą tej metody jest szybki czas analizy oraz możliwość badania próbek w stanie suchym lub mokrym. Niemniej jednak interpretacja wyników może być utrudniona w przypadku cząstek o nieregularnych kształtach lub w obecności aglomeratów.

Waga sedymentacyjna polega na pomiarze prędkości opadania cząstek w cieczy, co pozwala na określenie ich rozkładu wielkości. Technika ta jest szczególnie użyteczna dla cząstek o rozmiarach poniżej 100 μm . Zaletą metody jest jej prostota oraz możliwość analizy dużej liczby próbek. Jednakże dokładność pomiaru może być ograniczona przez czynniki, takie jak temperatura i gęstość medium, a także przez obecność cząstek o nieregularnych kształtach.

Mikroskopia optyczna w połączeniu z analizą obrazu umożliwia bezpośrednią obserwację i pomiar rozmiaru oraz kształtu cząstek w zakresie od ok. 1 μm wzwyż. Technika ta jest stosunkowo prosta i niedroga, jednak jej rozdzielczość jest ograniczona przez dyfrakcję światła, co uniemożliwia analizę bardzo małych cząstek. Ponadto subiektywność oceny oraz możliwość błędnej interpretacji kształtu cząstek stanowią dodatkowe ograniczenia.

Analiza sitowa jest tradycyjną metodą określania rozkładu wielkości cząstek poprzez przesiewanie materiału przez zestaw sit o określonych rozmiarach oczek. Metoda ta jest prosta i tania, jednak jej dokładność maleje w przypadku bardzo drobnych cząstek oraz nie dostarcza informacji o kształcie cząstek.

Dynamiczne rozpraszanie światła (DLS) mierzy fluktuacje intensywności światła rozproszonego przez cząstki w zawiesinie, co pozwala na określenie ich rozmiaru w zakresie od nanometrów do mikrometrów. Metoda ta jest szybka i precyzyjna dla małych cząstek, jednak jej efektyw-

ność maleje w przypadku próbek polidispersyjnych, a także nie dostarcza informacji o kształcie cząstek.

Wybór odpowiedniej metody zależy od specyfiki badanej próbki, w tym rozmiaru i kształtu cząstek, a także od dostępnego sprzętu i wymaganej dokładności pomiaru. Metody, takie jak SEM i mikroskopia optyczna dostarczają szczegółowych informacji o morfologii cząstek, jednak są czasochłonne i wymagają specjalistycznego sprzętu. Z kolei techniki, takie jak dyfrakcja laserowa i DLS umożliwiają szybkie i precyzyjne pomiary rozkładu wielkości cząstek, ale mogą być mniej efektywne w przypadku cząstek o nieregularnych kształtach lub w próbkach polidispersyjnych. Analiza sitowa i waga sedymentacyjna są prostymi i tanimi metodami, jednak ich dokładność jest ograniczona, a uzyskane informacje są mniej szczegółowe.

Współczesne badania koncentrują się na integracji różnych technik analitycznych w celu uzyskania kompleksowej charakterystyki cząstek. Przykładem jest połączenie mikroskopii elektronowej z analizą dyfrakcji laserowej, co pozwala na uzyskanie zarówno szczegółowych obrazów morfologii cząstek, jak i precyzyjnych danych dotyczących ich rozkładu wielkości. Takie podejście umożliwia bardziej wszechstronną analizę materiałów sypkich i zawiesin, co ma istotne znaczenie w wielu zastosowaniach przemysłowych i naukowych. Także wykorzystanie zautomatyzowanych analizatorów rozmiaru i kształtu cząstek w połączeniu z przetwarzaniem obrazu i sztuczną inteligencją są metodami z powodzeniem stosowanymi do uzyskiwania informacji o tych parametrach.

Prace badawcze w zakresie modelowania sedymentacji zawiesin nieziarnistych

Współczesne modele procesu sedymentacji zawiesin nieziarnistych znacząco rozszerzają zakres analizy, wychodząc poza tradycyjne podejście skupiające się jedynie na kształcie i rozmiarze cząstek. Obecnie uwzględniają szeroki wachlarz parametrów fizyczno-chemicznych, takich jak stężenie, pH, temperatura i właściwości lepkościowe medium, które mają kluczowe znaczenie dla dynamiki procesu sedymentacji. Równocześnie coraz częściej wykorzystuje się zaawansowane metody numeryczne, które umożliwiają precyzyjne modelowanie złożonych zjawisk zachodzących w zawiesinach, takich jak interakcje między cząstkami i wpływ zmiennych warunków środowiskowych. Dzięki tak kompleksowemu podejściu możliwe jest dokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych procesów sedymentacji, zarówno w aspekcie teoretycznym, jak i praktycznym. Rozwój tych metod przyczynia się do optymalizacji zarządzania procesami sedymentacyjnymi, umożliwiając skuteczniejsze projektowanie i kontrolę w warunkach przemysłowych oraz badawczych. Zapoznanie się z najnowszymi osiągnięciami w dziedzinie modelowania procesu sedymentacji jest kluczowe dla zrozumienia i optymalizacji

tego złożonego zjawiska. Współczesne podejścia uwzględniające zaawansowane metody numeryczne oraz analizę parametrów fizyczno-chemicznych zawiesin, stanowią fundament dla opracowywania bardziej precyzyjnych i skutecznych strategii zarządzania procesem. Dzięki śledzeniu najnowszych badań możliwe jest nie tylko rozwijanie istniejących technik, ale także identyfikacja obszarów wymagających dalszych ulepszeń, co ma istotne znaczenie zarówno w zastosowaniach badawczych, jak i przemysłowych.

Li i współpracownicy¹²⁾ w swoich badaniach nad procesem sedymentacji zastosowali kombinację metod teoretycznych, eksperymentalnych i terenowych, aby zbadać wpływ kluczowych czynników, takich jak stężenie zawiesiny, zasolenie, temperatura oraz obecność materii organicznej na prędkość osiadania cząstek. Wyniki ich analiz wykazały, że zarówno rozmiar, jak i kształt cząstek odgrywają kluczową rolę w dynamice procesu. Cząstki o regularnym, zbliżonym do sferycznym kształcie osiągają większe prędkości osiadania, zgodnie z przewidywaniami wzoru Stokesa, podczas gdy cząstki o nieregularnym kształcie wykazują większy opór aerodynamiczny, co zmniejsza ich prędkość opadania. W przypadku zawiesin o wysokiej koncentracji interakcje między cząstkami, takie jak flokulacja, prowadzą do tworzenia się większych agregatów o nieregularnych kształtach, które pomimo mniejszej gęstości osiadają szybciej niż pojedyncze cząstki dzięki większemu rozmiarowi efektywnemu¹³⁾. Badania te podkreśliły także konieczność uwzględnienia w modelach dynamiki nieregularnych kształtów oraz ich wpływu na siły działające w układzie, takie jak opór i wzajemne oddziaływanie cząstek. Opracowane modele teoretyczne oraz udoskonalone techniki laboratoryjne, takie jak metoda McLaughlina i modyfikowana metoda wycofywania dolnego (MBWT), pozwoliły na bardziej precyzyjne odwzorowanie procesu sedymentacji w kontrolowanych warunkach, uwzględniając wpływ kształtu i rozmiaru cząstek na prędkość osiadania.

Inne podejście zaproponowali Banaś i Hilger¹⁴⁾, którzy opracowali nową metodę określania efektywności procesu sedymentacji, bazującą się na zastosowaniu wymiaru fraktalnego. Metoda ta opiera się na modyfikacji klasycznego wzoru Stokesa poprzez uwzględnienie geometrii fraktalnej cząstek, co pozwala na bardziej precyzyjne modelowanie dynamiki osiadania nieziarnistych cząstek, takich jak agregaty i floki. W klasycznym modelu, skutecznym dla cząstek o regularnym, kulistym kształcie, wyniki nie odpowiadają rzeczywistym obserwacjom zawiesin z cząstkami o nieregularnych i rozwiniętych strukturach, takich jak flokule powstałe w procesach koagulacji. Wprowadzenie wymiaru fraktalnego umożliwiło dokładne uwzględnienie złożonej morfologii cząstek oraz ich właściwości, takich jak gęstość i opór hydrodynamiczny, co w klasycznym podejściu nie było możliwe. W proponowanym modelu fraktalnym cząstki fazy stałej są traktowane jako agregaty złożone z podstawowych cząstek o charakterze ziarnistym, tworzących rozbudowaną strukturę przestrzenną opisaną

wymiarem fraktalnym. Wzór opisujący prędkość końcową cząstek w tym modelu, uwzględniający wymiar fraktalny (D_f), uwzględnia wpływ kształtu, rozmiaru oraz oporu na prędkość osiadania. Dla cząstek o nieregularnych kształtach wprowadzenie współczynnika uwzględniającego prefaktor fraktalny oraz efektywność hydrodynamiczną pozwala na realistyczne odwzorowanie zjawisk sedymentacyjnych. Badania wykazały, że metoda fraktalna pozwala na lepsze dopasowanie wyników teoretycznych do danych eksperymentalnych, szczególnie w przypadku cząstek nieziarnistych. Do wyznaczenia wymiaru fraktalnego wykorzystano metody, takie jak dyfrakcja laserowa, która dostarcza szybkich i dokładnych wyników dotyczących rozkładu wielkości cząstek i struktury agregatów. Zastosowanie tej metody umożliwi nie tylko dokładniejsze oszacowanie parametrów osiadania, ale również optymalizację procesów przemysłowych, takich jak oczyszczanie wody i zagęszczanie zawiesin. Wyniki badań potwierdzają, że model fraktalny może być z powodzeniem stosowany do analizy i projektowania procesów sedymentacyjnych w szerokim zakresie zastosowań.

Fedorova i współpr.⁷⁾ przedstawili metodę opartą na połączeniu modelowania CFD i DPM do analizy efektywności procesu sedymentacji w strefie flokulacji. Model uwzględniał kluczowe parametry, takie jak natężenie przepływu zawiesiny, stężenie flokulantu, lepkość oraz temperatura medium, co pozwoliło na precyzyjne określenie rozkładu wielkości cząstek w strefie flokulacji oraz ich dalszego zachowania w procesie osadzania. Zastosowanie tej metody umożliwiło również identyfikację wpływu warunków operacyjnych na kinetykę flokulacji, w tym strategii dawkowania flokulantu i konstrukcji komory wstępnej. Badania wykazały, że precyzyjne dostosowanie parametrów przepływu zawiesiny oraz dawki flokulantu pozwala na optymalizację procesu flokulacji poprzez redukcję stref stagnacji cząstek oraz minimalizację efektów ponownego rozpadu agregatów. Dzięki temu możliwe było zwiększenie wydajności osadników oraz poprawa jakości oczyszczonej zawiesiny. Wyniki potwierdziły, że połączenie modeli CFD i DPM jest skutecznym narzędziem do analizy i optymalizacji procesów sedymentacyjnych w środowiskach o wysokiej dynamice przepływu i złożonej morfologii cząstek.

W swoich badaniach Riazi i Türker¹⁵⁾ opracowali nową metodę wyznaczania współczynnika oporu i prędkości osiadania cząstek fazy stałej osadów, która uwzględnia wpływ kształtu cząstek dzięki wprowadzeniu współczynnika kształtu Corey'a. Model ten zmodyfikował klasyczne podejście przez uwzględnienie relacji pomiędzy nominalnym rozmiarem cząstek, przyspieszeniem grawitacyjnym, lepkością kinematyczną płynu oraz kształtem cząstek, co pozwoliło na bardziej precyzyjne odwzorowanie procesów osiadania. Przeprowadzone badania wykazały, że proponowana metoda poprawia dokładność szacowania współczynnika oporu o 3,77% w porównaniu z powszechnie stosowanymi modelami. Udoskonalony wzór umożliwia

bardziej precyzyjne obliczenie prędkości osiadania w szerokim zakresie wartości liczby Reynoldsa, szczególnie dla cząstek o nieregularnych kształtach. Model potwierdził swoją skuteczność w eksperymentach, obejmując szeroką gamę kształtów i rozmiarów cząstek, co czyni go istotnym narzędziem w analizie procesów sedymentacyjnych i aplikacjach hydrotechnicznych.

Wykorzystanie metody DEM do modelowania procesu sedymentacji zaproponowali Bravo, Pérez-Aparicio i Gómez-Hernández¹⁶⁾, opierając się na jednokierunkowym sprzężeniu dynamicznym (*one-way coupling*) pomiędzy fazą płynną a cząstkami stałymi. Opracowany model uwzględnia kluczowe zjawiska zachodzące w układach wielofazowych, takie jak siły hydrodynamiczne, opory ruchu oraz kontakty międzycząsteczkowe, co pozwala na precyzyjne odwzorowanie zachowania cząstek w zawieszynie. Autorzy zastosowali model do analizy przestrzennego rozkładu cząstek w zawieszynie oraz określenia dynamiki ich osiadania w czasie, umożliwiając dokładną charakterystykę procesów sedymentacyjnych. Model został dostosowany do układów drobnodziarnistych, gdzie interakcje między cząstkami oraz ich zmienne właściwości powierzchniowe znacząco wpływają na dynamikę osiadania. Wyniki symulacji numerycznych wykazały wysoką zgodność z wynikami eksperymentalnymi, co potwierdziło skuteczność zastosowanej metody w modelowaniu złożonych procesów sedymentacji. Metoda DEM zastosowana w badaniu umożliwia szczegółową analizę parametrów, takich jak koncentracja cząstek, rozkład gęstości objętościowej oraz siły kontaktowe, co czyni ją efektywnym narzędziem w optymalizacji procesów wielofazowych.

Inne podejście do modelowania procesu sedymentacji za pomocą metody DEM zostało zaproponowane przez Peng i współpr.¹⁷⁾. Ich badania przedstawiają innowacyjną metodologię polegającą na połączeniu metody DEM z SPH (*smoothed particle hydrodynamics*), w której faza stała jest modelowana za pomocą siatki powierzchniowej SMR (*surface mesh representation*), umożliwiającej realistyczne odwzorowanie cząstek o dowolnym, nieregularnym kształcie. SPH z kolei jest wykorzystane do modelowania fazy płynnej, co pozwala na dokładne odwzorowanie interakcji pomiędzy płynem a cząstkami stałymi w układach wielofazowych, obejmujących m.in. ciecz nienewtonowskie. Zastosowanie połączonych modeli SPH-SMR-DEM pozwala na szczegółową analizę interakcji międzyfazowych, w tym sił normalnych i stycznych działających na powierzchnie cząstek. W porównaniu z klasycznymi metodami DEM, model ten oferuje wyższy poziom dokładności w odwzorowaniu zjawisk sedymentacyjnych, takich jak segregacja cząstek, przepływy heterogeniczne oraz interakcje w układach o złożonej morfologii cząstek. Model został zweryfikowany eksperymentalnie, co potwierdza jego skuteczność w analizie procesów sedymentacji w układach wielofazowych, szczególnie w warunkach wysokiej złożoności geometrycznej i dynamicznej.

Ważnymi badaniami w kontekście wykorzystania metody DEM w modelowaniu procesu sedymentacji były badania prowadzone przez Xie i współpr.⁶⁾, którzy udoskonalili podejście poprzez wprowadzenie modelu opartego na cząstkach grubego ziarna (*coarse-grained*). Metoda ta pozwala na znaczne zmniejszenie liczby symulowanych cząstek, jednocześnie zachowując kluczowe właściwości fizyczne procesu sedymentacji, takie jak prędkość osiadania, zmienność ciśnienia w cieczy i rozkład gęstości objętościowej cząstek. Badania wykazały, że *coarse-grained* DEM pozwala na precyzyjne odwzorowanie dynamiki osiadania zarówno pod względem jakościowym, jak i ilościowym, oferując wyniki porównywalne z modelami opartymi na cząstkach rzeczywistego rozmiaru. Ponadto metoda ta charakteryzuje się znacznie wyższą efektywnością obliczeniową w porównaniu z klasycznym DEM, co czyni ją szczególnie przydatną w analizach na dużą skalę. Wyniki badań potwierdziły, że metoda *coarse-grained* DEM jest skutecznym narzędziem w modelowaniu sedymentacji w układach ciecz-ciało stałe, umożliwiając dokładną analizę zjawisk w krótszym czasie obliczeniowym i przy mniejszych wymaganiach sprzętowych⁶⁾.

Podsumowanie

Ze względu na konieczność osiągnięcia wysokiej efektywności procesu przy jednoczesnym minimalizowaniu kosztów operacyjnych, optymalne projektowanie i kontrola procesu sedymentacji stają się kluczowymi elementami w różnych gałęziach przemysłu. Proces ten, choć stosowany od dziesięcioleci, napotyka na liczne wyzwania technologiczne wynikające z różnorodności charakterystyki zawieszin poddawanych separacji. Kształt i rozmiar cząstek fazy stałej, ich specyficzne właściwości fizyczno-chemiczne, takie jak temperatura, pH medium lub konieczność stosowania koagulantów i flokulantów, znacząco wpływają na dynamikę oraz efektywność procesu. Długotrwały charakter wielu procesów przemysłowych wymaga precyzyjnego dostosowania parametrów operacyjnych w celu maksymalizacji wydajności i minimalizacji kosztów.

Dobór odpowiedniego modelu procesu sedymentacji rozpoczyna się już na etapie charakterystyki ziarnowej i morfologii cząstek fazy stałej zawiesiny. Parametry, takie jak rozkład wielkości cząstek, ich kształt, struktura powierzchni i podatność na aglomerację mają kluczowe znaczenie dla opracowania modelu odzwierciedlającego rzeczywiste warunki pracy. Metody analityczne, obejmujące dyfrakcję laserową, mikroskopię elektronową i dynamiczne rozpraszanie światła (DLS), pozwalają na precyzyjne określenie tych właściwości, stanowiąc podstawę do budowy modeli matematycznych i numerycznych. Dobrze przeprowadzona analiza początkowa pozwala na wybór właściwego podejścia modelowego oraz parametrów eksperymentalnych i symulacyjnych.

Aby osiągnąć cele związane z optymalizacją procesu sedymentacji, konieczne jest stosowanie zaawansowanych modeli teoretycznych i numerycznych, które z dużą dokład-

nością odwzorowują rzeczywiste warunki pracy osadników. Współczesne modele sedymentacji zawieszin nieziarnistych koncentrują się na kompleksowym uwzględnieniu parametrów fizyczno-chemicznych, takich jak stężenie, pH, temperatura i właściwości lepkosprężyste medium. Pozwala to na dokładniejsze odwzorowanie procesów zachodzących w rzeczywistych warunkach oraz na analizę wpływu interakcji między cząstkami na dynamikę osadzania. Opracowane metody modelowania obejmują zarówno techniki teoretyczne, jak i eksperymentalne, które umożliwiają precyzyjne określenie prędkości sedymentacji i efektywności procesu w zróżnicowanych warunkach środowiskowych.

Rozwój technologii obliczeniowych oraz rosnąca dostępność danych eksperymentalnych otworzyły nowe możliwości w modelowaniu procesów sedymentacji. Uwzględnienie takich aspektów, jak nieregularny kształt cząstek, zjawiska flokulacji i osadzanie w warunkach zwiększonej koncentracji pozwala na realistyczne odwzorowanie procesów przemysłowych. Dzięki temu możliwe jest nie tylko zoptymalizowanie parametrów operacyjnych, takich jak czas zatrzymania, dawka reagentów i intensywność mieszania, ale również predykcja zachowania zawieszin w zmiennych warunkach pracy osadników.

Modelowanie numeryczne także umożliwia szczegółowe badanie zjawisk zachodzących podczas sedymentacji, uwzględniając interakcje między cząstkami, zmienne warunki przepływu oraz zmieniającą się w czasie charakterystykę zawieszin. Szczególną rolę odgrywają tutaj modele uwzględniające zarówno parametry fizyczno-chemiczne zawieszin, jak i zmienne środowiskowe, takie jak natężenie przepływu, koncentracja zawieszin i zastosowanie reagentów chemicznych. Techniki obejmujące metody elementów dyskretnych (DEM) i modele sprzężone CFD-DPM pozwalają na zaawansowaną analizę układów wielofazowych, dostarczając istotnych informacji dla projektowania i optymalizacji procesów.

Zaawansowane modele matematyczne uwzględniają nie tylko indywidualne cechy cząstek, takie jak kształt i rozmiar, ale także interakcje między nimi oraz wpływ otaczającego medium. Innowacyjne podejścia w modelowaniu, takie jak metody oparte na dynamice cząstek i symulacje numeryczne, pozwalają na bardziej wydajną analizę procesu osadzania zarówno w warunkach małego, jak i dużego stężenia zawieszin. Dzięki tym rozwiązaniom możliwe jest optymalizowanie parametrów operacyjnych, takich jak czas zatrzymania i dawka reagentów, co przekłada się na zwiększenie efektywności i zmniejszenie kosztów procesu sedymentacji. Integracja badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych umożliwia także lepsze zarządzanie procesem w zróżnicowanych zastosowaniach przemysłowych i badawczych.

Współczesne podejścia modelowe są kluczowe w kontekście zmieniających się wymagań środowiskowych, rosnących kosztów operacyjnych oraz konieczności przetwarzania coraz bardziej złożonych układów wielofazowych. Integracja wyników badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych z wykorzystaniem zaawansowanych technik obliczeniowych

umożliwia opracowanie strategii zarządzania procesem, dostosowanych do specyficznych warunków pracy. Dzięki temu nowoczesne modele sedymentacji przyczyniają się do poprawy efektywności, zmniejszania kosztów oraz zwiększania zrównoważonego rozwoju w wielu zastosowaniach przemysłowych.

Otrzymano: 26-11-2024

Zrecenzowano: 28-11-2024

Zaakceptowano: 27-12-2024

Opublikowano: 24-01-2025

LITERATURA

- [1] M. Banaś, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 9, 1454.
- [2] K. Kotodziejczyk, *E3S Web Conf.* 2018, **46**, 00011.
- [3] P. Krishnamoorthy, *Int. J. Sediment. Res.* 2010, **25**, nr 2, 119.

- [4] L. Bergougnoux, G. Bouchet, D. Lopez, É. Guazzelli, *Phys. Fluids* 2014, **26**, 093302.
- [5] D. Butko, O. Shishova, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2021, **937**, nr 4, 042058.
- [6] Z. Xie, Y. Shen, K. Takabatake, A. Yamaguchi, M. Sakai, *Powder Technol.* 2020, **361**, 21.
- [7] E. Fedorova, E. Pupyshva, V. Morgunov, *Symmetry* 2022, **14**, nr 11, 2314.
- [8] J.A. Nghiem i in., *Earth Surf. Dyn.* 2024, **12**, nr 6, 1267.
- [9] M.V.W. Cuttler, R.J. Lowe, J.L. Falter, D. Buscombe, *Sedimentology* 2017, **64**, nr 4, 987.
- [10] A.K. Rai, A. Kumar, *Int. J. Fluid Mech. Syst.* 2017, **10**, nr 2, 146.
- [11] D. Li, Y. Li, Z. Wang, X. Wang, Y. Li, *Int. J. Sediment Res.* 2016, **31**, nr 4, 341.
- [12] Y. Li, Z. Xu, X. Zhan, T. Zhang, *Water* 2024, **16**, nr 7, 938.
- [13] M.A.R. Mohammed, D.A.E. Halagy, *Al-Nahrain J. Eng. Sci.* 2013, **16**, 41.
- [14] M. Banaś, B. Hilger, *Materials* 2024, **17**, nr 13, 3285.
- [15] A. Riaz, U. Türker, *Comput. Part. Mech.* 2019, **6**, nr 3, 427.
- [16] R. Bravo, J.L. Pérez-Aparicio, J.J. Gómez-Hernández, *Adv. Water Resour.* 2015, **86**, 58.
- [17] C. Peng, L. Zhan, W. Wu, B. Zhang, *Powder Technol.* 2021, **387**, 509.

W ramach programu Ministerstwa Edukacji i Nauki
Rozwój czasopism naukowych
czasopismo
ochrona przed korozją
realizuje projekt RCN/SN/0650/2021/1²

40 punktów MEiN
Journal Impact Factor: **0,2**

Serdecznie zapraszamy autorów do nadsyłania artykułów z obszaru korozji i ochrony przed korozją. Zakwalifikowane do druku prace zostaną bezpłatnie przetłumaczone na język angielski. Zapewniamy szybki termin publikacji.

Czasopismo „Ochrona przed Korozją” publikuje artykuły naukowe w Otwartym Dostępie.

<https://www.sigma-not.pl/czasopisma-40-ochrona-przed-korozja.html>
<https://ochronapzedkorozja.pl/>