

Streszczenie – Sylwia Pawłowska

Eksperymentalna analiza dynamiki nano-objektów zawieszonych w cieczy

Przedmiotem pracy jest eksperymentalna analiza dynamiki nanoobjektów zawieszonych w cieczy. Celem przeprowadzonych zadań jest ocena roli oddziaływań hydrodynamicznych, chemicznych i fluktuacji brownowskich na dynamikę i parametry transportu w mikro i nanoskali dla obiektów sferycznych, silnie deformowalnych filamentów i makromolekuł.

W pierwszym etapie pracy przeprowadzono analizę ruchów brownowskich sferycznych nanocząstek (polistyrenowych, barwionych rodaminą) zawieszonych w elektrolitach. W pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań dotyczących wpływu siły jonowej medium oraz bliskości ścianki na wielkość średnicy hydrodynamicznej tychże sferycznych nano-objektów (efektywnego oporu lepkiego). Wykazano istnienie znacznych rozbieżności między danymi tabelarycznymi a faktycznymi współczynnikami oporu, reprezentowanymi przez tzw. średnicę hydrodynamiczną cząstki. Uzyskane wyniki wskazują na to, że średnica hydrodynamiczna nanocząstek sferycznych jest silnie zależna od siły jonowej medium, w którym cząstki zostały zawieszone, a także, że w zakresie niskich stężeń soli jej wartość spada wraz ze wzrostem siły jonowej. Pokazano również, iż na wielkość średnicy hydrodynamicznej ma wpływ zarówno wartościowość soli, jak i wielkość tworzących je jonów. Znajomość średnicy hydrodynamicznej nanocząstek bądź makrocząstek biologicznych w określonym środowisku jest niezbędna do określenia ich dyfuzji w badanym środowisku (np. środowisku wnętrza komórki, płynów ustrojowych). Stanowi to bardzo ważną informację na etapie projektowania układów nanocząstek jako obiektów w zastosowaniach biomedycznych.

Drugi etap badań dotyczył ruchliwości deformowalnych nano-objektów o strukturze analogicznej do długich makromolekuł. Są to wytworzone z materiału hydrożelowego nanofilamenty. Opracowano oryginalną metodę ich wytwarzania, wykorzystującą technikę elektroprzędzenia współosiowego. Technika ta pozwala na fabrykację włókien typu core-shell (rdzeń-otoczka), których to rdzeń stanowią hydrożelowe nanofilamenty. Nowością w prowadzonych badaniach jest zamknięcie w polimerowej otoczce hydrożelowego materiału w postaci filamentów charakteryzujących się wysoką elastycznością. Tenże hydrożelowy rdzeń stanowi mieszanina dwóch komponentów: akrylamid (AAm) bądź N,N'-izopropiłoakrylamid (NIPAAm) oraz czynnika sieciującego N,N'-metyleno bisakrylamidu (BIS-AAm).

Przedstawiona została metoda ewaluacji właściwości mechanicznych badanych filamentów poprzez analizę ruchów Browna. Istotą tych badań jest wyznaczenie wartości długości persystentnej analizowanego obiektu, która skorelowana jest z modułem Younga. Uzyskane wyniki pokazują, że nasze hydrożelowe nanofilamenty charakteryzują się wysoką elastycznością, zbliżoną do typowych materiałów biologicznych, wynoszącą poniżej 10 kPa. Dodatkowo, zmieniając proporcje pomiędzy komponentami tworzącymi hydrożel, możemy również sterować tą elastycznością. Jest to bardzo istotna właściwość materiału z punktu widzenia zastosowania takich wydłużonych obiektów w biomedycynie jako transporterów leków czy materiału implantu tkanki.

Po pełnej charakterystyce morfologicznej oraz właściwości mechanicznych, hydrożelowe nanofilamenty poddane zostały analizie ich zachowania w przepływie. Zbudowany układ eksperymentalny, bazujący na układach mikroprzepływowych, posłużył do analizy dynamiki deformacji oraz zjawiska migracji nanofilamentów w przepływie oscylacyjnym, symulującym przepływy międzykomórkowe i międzytkankowe w żywych organizmach. Zbadane zostało zjawisko migracji tych obiektów w poprzek kanału. To zagadnienie jest istotne dla opisu transportu deformowalnych makromolekuł w kapilarach. Wykazano, iż kierunek migracji zależy od charakterystyk przepływu, położenia w kanale i deformacji filamentu. Obserwacja zachowania badanych nanofilamentów w przepływie oscylacyjnym pozwoliła na wydzielenie trzech grup tych obiektów: „bent-like”, „U-shaped buckled”, „U-shaped stretched”, wykazujących pewne różnice pod kątem właściwości zginania, orientacji w przepływie i kierunku migracji. Obserwacje te pozwalają nam wnioskować, że „bent-like” nanofilamenty mogą symulować zachowanie elastycznych biomolekuł takich jak DNA lub białka, podczas gdy nanofilamenty należące do dwóch pozostałych grup bardziej przypominają zachowaniem semi-elastyczne makromolekuły, jak filamenty aktynowe. Wyniki te wykazały słuszność postawionej tezy mówiącej o dużym potencjale wykorzystania przepływu oscylacyjnego w badaniu mikro- i nano-obiektów do zastosowań w inżynierii biomedycznej.

Przeprowadzone badania dynamiki nanofilamentów stwarzają możliwość ich wykorzystania jako modeli wydłużonych cząstek biologicznych, takich jak białka i DNA, co stanowi potwierdzenie tezy trzeciej niniejszej pracy. Analiza ich przemieszczania i deformacji w przepływie wspomogła weryfikację istniejących już modeli teoretycznych, jak również pomoże w zrozumieniu zjawisk fizycznych odpowiedzialnych za fałdowanie i dynamikę zginania biomolekuł. Kolejnym bardzo ważnym celem pracy jest możliwość wykorzystania takich silnie deformowalnych obiektów, charakteryzujących się właściwościami fizycznymi bliskimi żywym tkankom, w zastosowaniach biomedycznych, jako systemy kontrolowanego

uwalniania leków, transportery substancji leczniczych w konkretne miejsce w organizmie, systemy do regeneracji tkanek. Podjęto próbę scharakteryzowania profili uwalniania substancji symulującej lek z hydrożelowych nanofilamentów. Obiekty takie mogą stanowić nanotransportery substancji o działaniu leczniczym, które w sposób kontrolowany i ukierunkowany uwalniają lek do miejsca zaatakowanego chorobą. Przeprowadzone badania wykazały, że zmieniając proporcję pomiędzy komponentami tworzącymi hydrożel, możliwe jest kontrolowanie szybkości uwalniania substancji np. leku. Całościowe zrozumienie dynamiki pojedynczych obiektów jest kluczowe dla ich dalszych zastosowań biomedycznych.

Słowa kluczowe: średnica hydrodynamiczna, ruchy Browna, współczynnik dyfuzji, hydrożelowe nanofilamenty, migracja radialna cząstek zawiesiny, dynamika zginania, właściwości mechaniczne.