

2017 -05- 18 *MBiut*

Bydgoszcz, 14 maja 2017

Prof. dr hab. Adam Gadomski  
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy  
Instytut Matematyki i Fizyki  
Zakład Fizyki, Zespół Modelowania  
Procesów Fizykochemicznych  
Kaliskiego 7/421, 85-796 Bydgoszcz  
Tel./Fax: 52-3408697(...43)  
Email: agad@utp.edu.pl

## Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana Magistra Michała Edwarda Pecelerowicza  
pt. **MODELE IGŁOWE PROCESÓW WZROSTU NIERÓWNOWAGOWEGO**,  
wykonanej pod kierunkiem dr. hab. Piotra Szymczaka, profesora nadzwyczajnego  
w Instytucie Fizyki Teoretycznej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

### CEL PRACY I JEGO REALIZACJA

Głównym celem pracy jest zastosowanie deterministycznych modeli igłowych do badania późnych, nieliniowych etapów ewolucji w procesach cyt. wzrostu nierównowagowego. Założono, że wskutek niestabilności frontu oraz szumu w badanym układzie wytworzyła się już pewna liczba wyróżnialnych zaburzeń gładkiego brzegu, które można potraktować - w zakresie dobrze pracującego przybliżenia - jako obiekty efektywnie jednowymiarowe o charakterze igłowym. Autor pracy zastrzega się, że weryfikacja modelu może mieć charakter dwojaki. W przypadku procesów o prostszej dynamice, jak np. cienkie, lepkie paluchy rozwijające się w sieci kanałów mikrofluidycznych, spełniających założenia „wbudowane w model Laplace’a”, o bardzo małej średniej szerokości igieł w stosunku do odstępów między-igłowych, możliwe staje się stosunkowo wierne odtworzenie wynikających z modelu morfologii. W przypadku procesów złożonych można użyć proponowany sposób modelowania, oparty o zagadnienie Laplace’a i technikę odwzorowań konforemnych, do jakościowego odtworzenia i zrozumienia otrzymywanych morfologii igłowych, w ograniczonej przestrzeni geometrycznej, zawierającej się typowo w dwuwymiarowej przestrzeni Euklidesa, tj. jej podobszarze, ze szczególnym wskazaniem na morfologie o charakterze rozgałęzionym, odtwarzane wszakże w sposób uproszczony, z uwzględnieniem cechy wierności odwzorowania konforemnego. To odwzorowanie jest traktowane w aspekcie dynamicznym z użyciem równania Loewnera, szczególnie korzystnego w kontekście modelowania dynamiki zakrzywiających się igieł. (Numeryczna procedura całkowania tego równania została przedstawiona w podrozdz. 3.3.1; szkoda, że nie załączono w Dodatku listingu wykonawczego dla tej procedury i nie podano nieco szczegółów realizacyjnych dot. np. języka czy też środowiska programowania.) Wypada odnotować, że stochastyczny odpowiednik równania Loewnera służy do modelowania zjawiska agregacji limitowanej dyfuzją (DLA), tzw. model stochastyczny Hastingsa-Levitova, zawierający biały szum (Gausowski). Agregacja tego typu, zgodnie z modelem Witten-Sandera (W-S) z roku 1981, została po raz pierwszy zracjonalizowana w oparciu o zagadnienie Laplace’a z absorbującą granicą wewnętrzną oraz stałym źródłem pola dyfuzyjnego w nieskończoności. Niespodzianką, w stosunku do modelowania z użyciem warunku typu Gibbsa-Thomsona na brzegu powstającej struktury, zracjonalizowanej wcześniej poprzez opis izotermicznej niestabilności morfologicznej w sensie Mullinsa-Sekerki, było to, że otrzymywane na drodze symulacji rozgałęzione morfologie radialnie symetryczne (dla  $d=2$ ,  $d$  – wymiar przestrzeni

Euklidesa) miały charakter fraktalny o wymiarze ułamkowym  $D < d$ , w opisie W-S wynoszącym  $D=1.7$ .

Uważam, że cel rozprawy został sformułowany w sposób jednoznaczny, tzn. jako zastosowanie deterministycznych modeli igłowych do badania późnych, nieliniowych etapów ewolucji w procesach wzrostu nierównowagowego, aczkolwiek jednak nieostry, ponieważ autor zgodnie z tytułem swojej rozprawy, bardziej odnajduje swoją rolę w realizacji technik modelowania zjawisk dynamicznych z udziałem morfologii igłowych, aniżeli stawia sobie pewne trudne fizyczne pytania. Chodzi o pytania wskazujące na to, co jest naprawdę istotne w tym modelowaniu, tj. jakie problemy praktyczne wymagają pilnego rozwiązania, a jakie stanowią tylko swoistą wisienkę na torcie zagadnień już dostatecznie dobrze rozpracowanych, jak choćby te makroskopowe, poświęcone geofizyce i geomorfologii formowania koryta rzeki i jej dopływów, itp. Innymi słowy, należy tutaj odnosić się wytrwale i ustawicznie do skalowalnego charakteru badanych morfologii i ich swoistej, na ogół jednak statystycznej, a nie deterministycznej, asymptotycznej (nie)zależności od skali czasowo-przestrzennej, a także energetycznej, jak to ma miejsce w tzw. przestrzeni *ultrametrycznej*, w której odpowiednie porcje energii są przypisywane w sposób skalowalny (potęgowo zależny bądź algebraiczny) do odpowiednich obszarów dynamiczno-geometrycznych badanych morfologii. Takich rozważań nie odnotowałem jednak w recenzowanej rozprawie doktorskiej, może bardziej z tego powodu, iż autor rozprawy zwraca uwagę na kinetykę analizowanych/modelowanych procesów, bez jasnego i wyraźnego włączenia do modelowania równie ważnego efektu o charakterze termodynamicznym – w konkretnych przypadkach, np. tych dotyczących lepkich paluchów i ich dynamiki, podejmuje aspekt napięciowo-powierzchniowy, ponieważ jest on jednoznacznie istotny do oceny modelowania dynamiki całego zjawiska ich morfogenezy. Wzmiankuje on także, co świadczy bardzo na jego korzyść, istotność tego efektu w przypadku występowania rozgałęzień podczas ruchu granicy międzyfazowej.

#### KRYTYCZNA DYSKUSJA GŁÓWNYCH OSIĄGNIĘĆ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Wyniki rozprawy doktorskiej zostały częściowo opublikowane w czterech następujących pracach oryginalnych:

1. *Competition between anisotropic viscous fingers*, Eur. Phys. J. Special Topics, 223, 1895-1906, 2014 (M. Pecelerowicz, A. Budek, P. Szymczak), (auto)cytowana dwukrotnie;
2. *Effective description of the interaction between anisotropic viscous fingers*, Eur. Phys. Lett., 108, 14001, 2014 (M. Pecelerowicz, A. Budek, P. Szymczak), (auto)cytowana trzykrotnie;
3. *Stabilizing effect of tip-splitting on the interface motion*, Phys. Rev. E, 94, 062801, 2016 (M. Pecelerowicz, P. Szymczak), ukazała się w grudniu 2016 – jeszcze niecytowana;
4. *Laplacian networks: Growth, local symmetry and shape optimization*, Phys. Rev. E, 2017 (O. Devauchelle, P. Szymczak, M. Pecelerowicz, Y. Cohen. H. Seybold, D. H. Rothman), ukazała się końcem marca 2017 – jeszcze niecytowana.

Jakość czasopism, w których te częściowe, choć stanowiące przecież trzon pracy doktorskiej Pana Pecelerowicza wyniki zostały opublikowane, jest na właściwym, tj. znaczącym poziomie. Pewne zastanowienie budzi z kolei niewielka stosunkowo liczba środowiskowych wzmiankowań tych artykułów, choć z drugiej strony wypada zauważyć, że dwa ostatnie wg przyjętej chronologicznej numeracji, są praktycznie dopiero co opublikowane. Recenzent tej rozprawy będzie z uwagą śledził dalszy ich los.

Jak podkreśla autor, pięć pierwszych rozdziałów pracy ma na celu wprowadzenie do podjętego sposobu modelowania morfologii igłowych. Należy ocenić tę część pracy bardzo pozytywnie. Autor wykazał się dużą zdolnością do usystematyzowania wszystkich wyselekcjonowanych przykładów i technik analityczno-numerycznych, służących do podjęcia modelowania efektywnej dynamiki (choć może kinetyki?) morfologii igłowych.

Trzy kolejne rozdziały (6-8) poświęcone są rozszerzeniu modelu igłowego o nowe elementy, istotne dla opisu konkretnych układów fizycznych. W rozdziale 6 wprowadzono model igłowy dla geometrii prostokąta i pierścienia. Geometrie te odtwarzają kształty typowych komórek Hele-Shawa, w których przeprowadzana jest znacząca liczba eksperymentów wzrostu niestabilnego. Tematem podjętym w rozdziale 7 jest problem rozszczepień igłowych, prowadzący do powstawania dendrytów. Omówione zostały znane w literaturze wyniki analityczne dotyczące bifurkacji a następnie przedstawiono metodę implementacji rozszczepień z uwzględnieniem wzmiankowanej już procedury numerycznej. W rozdziale 8 przedstawiono metodę generowania igieł wzrastających równolegle, wykorzystywanych w badaniu praktycznego zagadnienia generowania paluchów lepkości w sieci mikrokanalów, jak również wyprowadzono odpowiednie równania dla geometrii walca i kanału.

Rozdziały 9-10 rozprawy dotyczą aplikacji modeli igłowych do opisu zjawisk rzeczywistych. Rozdział 9 został poświęcony układom, w których mają miejsce „krytyczne rozszczepiania” dendrytów wskutek destabilizacji frontu międzyfazowego po przekroczeniu pewnej prędkości krytycznej ewent. progowej. Zostały również przedyskutowane charakterystyczne cechy tego rodzaju mikrostruktur, w szczególności rozpatrzony został problem tzw. stabilnie wzrastających obwiedni. W rozdziale 10 podjęto z kolei problem modelowania struktur powstających w procesie formowania paluchów lepkości w dwuwymiarowej sieci mikrokanalów. Zaobserwowana zbieżność otrzymywanych kształtów paluchów z przewidywaniami modelu implikuje jasno wyłaniającą się obserwację podstawową, że późniejsze etapy ewolucji rządzone są niemal wyłącznie przez zjawiska o charakterze deterministycznym. Ponadto ich dynamika jest na tyle nieskomplikowana, że może zostać opisana na gruncie modelu igłowego, który z kolei pozwala wyznaczyć długości poszczególnych dendrytów w końcowym etapie ewolucji, przy założeniu, że znane są ich długości na bardzo wczesnych etapach.

Przedstawiona w recenzowanej rozprawie analiza wykazała, że pomimo swojej prostoty, model igłowy jest wystarczająco skuteczny w opisie późnych, nieliniowych etapów ewolucji w procesach wzrostu nierównowagowego. Przy okazji, wydaje się jednoznacznie, że określenie ‘wzrost nierównowagowy’ używane wielokrotnie przez autora rozprawy, z włączeniem jej tytułu, nosi znamiona truizmu, gdyż recenzent nie spotkał się nigdy z przeciwpojęciem wzrostu równowagowego, a może co najwyżej, wzrostu jako procesu stacjonarnego, tj. realizowanego, jak np. w układach z konwekcją masy, ze stałym tempem wzrostu.

Idąc dalej, w przypadku zjawiska paluchów lepkości w sieci kanałów mikrofluidycznych, co stanowi niewątpliwy atut tej rozprawy (jako realizacja praktyczna modelu igłowego), model igłowy pozwala na uchwycenie wszystkich istotnych składników dynamiki, co pociąga za sobą ścisłą predykcję kształtu formowanych mikrostruktur. W bardziej złożonych, nieliniowych układach z rozszczepieniami (nieliniowościami mikrostrukturalnymi!), pozwala natomiast odtworzyć geometryczną charakterystykę powstających morfologii oraz – bardziej jakościowo, aniżeli ilościowo – uchwycić prawdziwy charakter obserwowanych zjawisk.

Sugeruje się w podsumowaniu rozprawy (rozd. 11), że opracowany model może być użyteczny np. w procesie tworzenia dendrytów bocznych w zjawisku zestalania fazy fluidalnej, jak również w procesie formowania tzw. kanałów rozpuszczeniowych w szczelinach skalnych, obiektu dużych zainteresowań promotora tej rozprawy doktorskiej.

Reasumując, recenzent tej rozprawy doktorskiej podtrzymuje swoje zdanie, że znaczące skupienie się jej autora na technikach modelowania wzrostu igłowego, choć wykonane bardzo

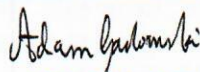
systematycznie i klarownie, odbiło się nieco na przekazaniu dobrze opracowanego komunikatu, a nawet receptury postępowania, w stronę eksperymentatora (co komplikuje sytuację, gdy byłby to nie fizyk eksperymentalny, a np. nieźle matematycznie wykształcony inżynier lub technolog), mogącego pomóc w rozwiązaniu istotnych problemów szczegółowych, których autor tej rozprawy *explicite* nie wypunktował, a bardziej skupił się na metodologii i analizie modelowania pewnych wybranych przez siebie przykładów, co jednak stanowi samo w sobie wartościowe i rzetelne dokonanie.

#### PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W podsumowaniu recenzji, biorąc pod uwagę wszystkie przedstawione w tej recenzji argumenty i kontr-argumenty za, bądź ewentualnie nieco przeciw podjętemu przez kandydata sposobowi i metodyce rozwiązywania - na podstawie wybranych przykładów - zagadnienia wzrostu igłowego, wyrażam pozytywną opinię na temat ciekawie i systematycznie, a także wszechstronnie, poprowadzonej dyskusji tego nierównowagowego (oczywiście w sensie termodynamicznym: dość ostrożnie to poruszany w pracy wątek?) zjawiska o złożonym charakterze. Na tę ocenę zasługuje wszechstronny koncepcyjny oraz analityczno-numeryczny wkład własny jej autora, jak i potencjalnie znaczące praktyczne wykorzystanie uzyskanych wyników rozprawy doktorskiej. Ponadto, wypada zauważyć, że ogólny problem kontroli propagacji/ewolucji frontu międzyfazowego jest nadal problemem nierozwiązanym, choć rozwiązania doczekała się już, co potwierdza i ta praca doktorska, pewna liczba ważnych z praktycznego, a głównie technologicznego punktu widzenia, przypadków szczegółowych.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr. Michała Pecelerowicza stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza jego ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie objętym znajomością podstaw fizycznych teorii formowania struktur oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w zakresie nierównowagowych faz morfologicznych. Stanowi to podstawę do stwierdzenia, że powierzona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia w całej rozciągłości wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, wraz z późniejszymi zmianami. W związku z powyższym z przyjemnością wnioskuję do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie Pana Magistra Michała Pecelerowicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Adam Gadomski



Prof. dr hab. A. Gadomski  
UTP, IMiF-ZF, Grupa MPFCh  
Kaliszkiego 7, 85-796 Bydgoszcz