

Warszawa, dnia 19 maja 2017

dr hab. Krzysztof Mizerski, prof. PAN  
Instytut Geofizyki PAN  
ul. Księcia Janusza 64  
01-384 Warszawa

## **Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgr Michała Pecelerowicza pt.**

### **„Modele igłowe procesów wzrostu nierównowagowego”**

Rozprawa doktorska pana mgr Michała Pecelerowicza, napisana pod kierunkiem dr-a hab. Piotra Szymczaka dotyczy opisu analityczno-numerycznego procesów wzrostu nierównowagowego struktur typu palce lepkościowe, spalanie w jednorodnym strumieniu tlenu, osadzanie jonów w procesie elektrolizy itp. Wyniki otrzymane przez doktoranta zostały opublikowane w czterech publikacjach w dobrych czasopismach z listy filadelfijskiej (jedna praca w European Physical Journal – Special Topics (Impact Factor: 1.42), jedna w Europhysics Letters (IF: 2.23) i dwie w Physical Review E (IF: 2.25)). Praca koncentruje się na nieliniowych aspektach procesu wzrostu, zaś faza początkowa jest w modelowaniu pominięta, choć niestabilność powodująca początkowe zróżnicowanie przestrzenne wzrastających struktur jest omówiona w rozdziale drugim. Doktorant skupił się na zastosowaniach tzw. modelu igłowego, polegającego na sprowadzeniu zagadnienia wzrostu do narastania cienkich igieł, które mogą wzrastać tylko na czubku. Jest to przybliżenie satysfakcjonujące, dobrze przez doktoranta opisane i udokumentowane, a także jak wykazano w pracy użyteczne, gdyż potrafi oddawać rzeczywistą dynamikę z dobrą dokładnością.

Jako najważniejsze wyniki doktoranta wymienić należy:

1. opis oraz analizę ilościową procesów wzrostu struktur w układach ograniczonych o geometrii prostokąta oraz pierścienia, przy użyciu sformułowanego w pracy kryterium rozszczepienia narastających igieł, polegającego na wprowadzeniu granicznej prędkości wzrostu igły, powyżej której rozszczepia się ona,
2. wyprowadzenie równań ewolucji struktur dla geometrii walca i kanału,
3. charakterystyka różnego typu wpływu ścianek na kształt frontu i ewolucję narastających struktur,
4. oraz wyjątkowo dobrze zgodny z eksperymentem opis narastania palców lepkościowych w sieci kanałów mikrofluidycznych.

Struktura pracy jest jasna i klarowna. Składa się ona z pięciu rozdziałów, szczegółowo wprowadzających w tematykę analizowaną w pracy, w szczególności opisujących cały formalizm matematyczny oraz zastosowania fizyczne przyjętego modelu igłowego. W następnych pięciu rozdziałach doktorant opisuje wyniki własne, gdzie korzystając z poprzednio sformułowanych i uzasadnionych związków analizuje on konkretne zagadnienia wymienione w powyższych punktach 1-

4. Ostatni rozdział to podsumowanie całej pracy. Ponadto praca zaopatrzona jest w trzy dodatki, poświęcone wyprowadzeniom matematycznym faktów, z których doktorant korzysta w pracy, tzn. równań płytkiej hydrodynamiki, prostych faktów dotyczących formalizmu przekształceń konforemnych oraz zbieżności szeregów pojawiających się w analizie. Ogółem praca składa się z jedenastu rozdziałów, w tym wstęp i podsumowanie oraz trzech dodatków.

Pracę doktorską pana Michała Pecelerowicza oceniam bardzo wysoko pod względem naukowym. Bardzo dobrze opanował on techniki analizy teoretycznej stosowne w opisie procesów wzrostu nierównowagowego, polegających w dużej mierze na formalizmie potencjałów zespolonych, a zatem na odwzorowaniach konforemnych. Praca szczegółowo przedstawia wszystkie kroki prowadzące do uzyskania podstawowych równań i zależności, jak również pokazane są założenia do nich prowadzące. W szczególności na uznanie zasługuje analiza wzajemnych interakcji pomiędzy procesami rozszczepień a procesami nieliniowego ekranowania mniejszych igieł, prowadzące do stabilizacji frontu narastających struktur, prowadząca do opisu dobrze zgodnego z obserwacjami. Należy podkreślić, iż badania propagacji frontu narastających struktur nie ograniczały się do jednej geometrii, ale wpływ „odbijających”, jak i „przyciągających” ścianek na kształt frontu został także przebadany. Szczególne wrażenie robi bardzo dobra zgodność teoretyczno-numerycznego opisu procesu wzrostu lepkościowych palców z eksperymentem przeprowadzonym w kanałach mikrofluidycznych, oddających w dużej mierze jednowymiarowość igieł założoną w modelu. Jakość wyników, potwierdzona faktem opublikowania ich w czterech artykułach w dobrych czasopismach naukowych, jest moim zdaniem wysoka i całkowicie wystarczająca pod względem wymagań stawianych pracom doktorskim.

Pomimo to mam kilka uwag krytycznych. Dwie najważniejsze dotyczą pewnych niejasności w opisie wyników, zaś pozostałe są czysto techniczne i ich znaczenie jest niewielkie. Po pierwsze w rozdziale 4.1, powyżej równań (4.5) oraz (4.8) powiedziane jest, iż prędkość wzrostu w istocie zależy od grubości palców, jednak przeskalowanie czasu pozwala też zależność usunąć. Oznacza to, iż wyznaczone z modelu prędkości nie są w istocie znane, ponieważ nie znana jest skala czasu (rozrost struktury następuje w niezdefiniowanej jednostce czasu). Wydaje mi się, że na miejscu byłby tutaj komentarz polegający na tym, iż w modelowaniu rzeczywistego układu grubość palców bierze się z eksperymentu, tak jak zostało to zresztą zrobione w rozdziale 10, gdzie w równaniu (10.4) pojawiła się powierzchnia przekroju poprzecznego palca  $s$ , a wówczas prędkość wzrostu jest już określona jednoznacznie. Inną możliwością jest po prostu komentarz stwierdzający, że model nie wyznacza bezpośrednio prędkości, ale stosunek prędkości do pierwiastka grubości palca. Po drugie, w rozdziale 9 stwierdzone jest w krótkim akapicie pomiędzy równaniami (9.1) i (9.2), że prędkość frontu struktury jest stała i utrzymuje się nieco poniżej prędkości granicznej rozszczepienia igły,  $v_c$ . Analizując opis dynamiki procesu i podane przez doktoranta w pracy wykresy widać, iż stwierdzenie to jest dość bliskie prawdy, jednak pozostaje mocno enigmatyczne. Np. oszacowanie współczynnika narastania fitu do punktów na wykresie 9.18 pozwoliłoby na faktyczne porównanie prędkości propagacji frontu i  $v_c$ . Ponadto, można by się pokusić o uśrednienie równań dynamiki i znalezienie wyrażenia, lub

choćby równania ewolucji na średnią prędkość propagacji. Warunek o pochłanianiu całego strumienia docierającego do układu jest słuszny, ale tylko w geometriach zamkniętych.

Wszystkie pozostałe uwagi techniczne postaram się wymienić w poniższej liście:

1. Po pierwsze w pracy używane jest określenie „paluchy” lepkości. Uważam, że zwykle określenie „palce” brzmi znacznie lepiej.
2. Rysunek 1c wygląda jak zobrazowanie wyniku symulacji, co, jeśli tak jest w istocie, powinno być zaznaczone w tekście.
3. Strona 7, środek: dwuwymiarowe ciśnienie powinno być raczej zastąpione przez ciśnienie w dwuwymiarowym układzie.
4. Na samym początku w rozdziale jeden używany jest termin wysokość w odniesieniu do długości palców. Wówczas jeszcze nie jest jasne, dlaczego doktorant nazywa to wysokością (palce mogłyby być równie dobrze poziome).
5. Oznaczanie wielkości wektorowych przez górną strzałkę jest nietypowe – najczęściej używa się po prostu pogrubionej czcionki.
6. Równanie (2.2) jest prawdziwe tylko przy założeniu stałego gradientu ciśnienia.
7. Równania (2.8) i (2.22) – dwa różne oznaczenia tego samego operatora Laplacea. Z kolei w równaniach (2.23-2.24)  $A_1$  i  $A_2$  są funkcjami od czasu, a nie stałymi. Potem znowu nad (2.31).
8. Strona 21, środek: „maksymalna długość wzmacnianej fali” powinna zostać zmieniona na „długość maksymalnie wzmacnianej fali”.
9. Strona 25, środek: w definicji liczby Pecleta pojawia się współczynnik dyfuzji oznaczony przez  $D$ , bez wyjaśnienia, podczas gdy chwilę wcześniej  $D$  oznaczało stosunek skal długości na kierunkach  $x$  i  $y$ .
10. Strona 28: dobrze byłoby wspomnieć, że definicja funkcji holomorficznej mówi, iż znika pochodna po zespolonym sprzężeniu zmiennej  $z$ .
11. Początek rozdziału 3.2.3: prostokąt jest symetryczny względem osi  $y$ , nie zaś początku układu współrzędnych.
12. Równanie (3.35) – czy znak minus nie powinien zostać zastąpiony przez znak plus?
13. Równanie (4.2) – skąd się ono bierze? Powinna być zacytowana praca, gdzie zostało to pokazane.
14. W równaniu (4.4) usunąłbym dwójkę; skoro epsilon ma oddawać grubość palca należałoby całkować po półokręgu, a nie po całym.
15. Wybór (4.6) lub (4.7) wiąże się z problemem skali czasu i jej relacji do grubości palca omówionym powyżej. Czy to eksperyment ustala który z tych modeli należy wybrać?
16. Równanie (4.12): standardowo część rzeczywista określa potencjał, a urojona funkcję prądu, jak poniżej równania (3.6).
17. Rysunek 4.3: brak konsystencji z poprzednim oznaczeniem epsilon, które odnosiło się do przestrzeni rzeczywistej.
18. Poniżej równania (4.47):  $\pi/5$  to już nie jest argument  $z$ .
19. Rozdział 9: czy jakieś bardziej ilościowe porównania z eksperymentem, jak choćby wyznaczenie wymiaru fraktalnego obserwowanych i wyznaczanych numerycznie struktur są możliwe?

20. Czym jest  $v_s$  na stronie 97?
21. Rozdział 9: skąd brana jest wartość krytycznej wartości prędkości wywołującej rozszczepienia  $v_c$ ?
22. Dodatek A, strona 132: w równaniu (A.10)  $L$  powinno być w pierwszej potęgde; w akapicie poniżej pomijany jest człon nieliniowy, nie zaś lepki. Z kolei (A.12) jest prawdziwe tylko dla stałego gradientu ciśnienia.

Stwierdziwszy powyższe, należy podkreślić, iż wszystkie wymienione uwagi nie mają charakteru fundamentalnego i w mojej ocenie mogą być sklasyfikowane jako drobne niedociągnięcia. Całą pracę oceniam zatem bardzo wysoko. Duża dociekliwość doktoranta pozwoliła na przebadanie bardzo wielu aspektów dynamiki procesów wzrostu nierównowagowego, o szerokiej uniwersalności. Doktorant wykazał się bardzo dogłębnym zrozumieniem tematu oraz znajomością metod matematycznych i zaprezentował ściśle i systematyczne podejście do opisu ewolucji narastających struktur. Wnioski, dotyczące stabilizacji frontu struktury poprzez rozszczepienia są nowe i bardzo ciekawe, choć wymagają dalszej dyskusji. Z kolei wpływ geometrii na dynamikę procesu wzrostu jest nietrywialny i dobrze udokumentowany i wyjaśniony. Dobra zgodność zaproponowanego modelu z kształtami i dynamiką obserwowanych struktur istotnie wpływa na całkowitą, bardzo wysoką jakość pracy.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa doktorska nie pozostawia żadnych wątpliwości, iż spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa, w tym Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję o dopuszczenie pana mgr Michała Pecelerowicza do dalszego postępowania kwalifikacyjnego.

  
Krzysztof Mizerski