

Warszawa, 8 września 2023 r.

Opinia nt. rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Damiana Zaremby pt. *Sequential Logic and Iterative Systems in Droplet Microfluidics*.

Niniejsza opinia została sporządzona na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, zgodnie z uchwałą o powołaniu recenzentów podjętą na posiedzenie Rady w dniu 29 czerwca 2023 r.

1. Informacja o Doktorancie

Pan Damian Zaremba urodził się 18 maja 1989 r. w Giżycku. W latach 2008-2012 był uczestnikiem studiów 1-ego stopnia na kierunku Inżynieria Biomedyczna prowadzonym na Wydziale Mechatroniki PW. Po ukończeniu tych studiów z wynikiem bardzo dobrym, Pan Zaremba rozpoczął studia magisterskie na tym samym wydziale, jednocześnie podejmując pracę w Zakładzie Ultradźwięków IPPT PAN w roli pracownika inżynierskiego, na stanowisku elektronika. W grudniu 2015 r. Pan Damian Zaremba ukończył studia magisterskie w PW uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera. Na początku 2016 r. Pan Zaremba dołączył do kierowanego przez dra hab. Piotra M. Korczyka zespołu realizującego w Zakładzie Mechaniki i Fizyki Płynów IPPT projekt naukowy Sonata BIS. W październiku tego roku rozpoczął studia doktoranckie w IPPT na kierunku mechanika płynów. Promotorem Pana Damiana Zaremby został dr hab. Piotr Korczyk, a tematyka badań w ramach rozprawy dotyczyła dwufazowych układów mikroprzepływowych. Pan Zaremba był uczestnikiem studiów doktoranckich do 2021 r. Podczas czwartego roku studiów (w r. 2020) Pan Zaremba został zatrudniony w Zakładzie Biosystemów i Miękkiej Materii (dawniej ZMiFP) IPPT na stanowisku asystenta. Zatrudnienie to trwało do października 2022 r.

2. Ocena formalna dokumentacji złożonej przez Doktoranta

Podstawą wystąpienia Doktoranta o nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna jest cykl czterech publikacji naukowych opublikowanych w czasopiśmie posiadających IF. Są to publikacje współautorskie, w których Doktorant jest pierwszym autorem. Prace z tego cyklu publikowane były w latach 2018-2022 i dokumentują m.in. wyniki naukowe projektu NCN, w którym uczestniczył Doktorant. Ponadto, w przedstawionym dorobku znajdują się dwie inne, ściśle powiązane tematycznie z prezentowanym cyklem, prace, w których Doktorant zajmuje dalsze miejsca na liście autorów.

Autorskie publikacje Doktoranta zostały zamieszczone w rozprawie w formie załączników do części głównej liczącej, wraz z bogatą bibliografią, 57 stron. W tej części rozprawy (napisanej w języku angielskim) Doktorant przedstawił ogólny kontekst badań i stan wiedzy, następnie sformułował tezę badawczą i cele naukowe. Dalej, praca zawiera opis zastosowanych technologii i metod eksperymentalnych. Kluczowy rozdział w tej części pracy zawiera opis treści merytorycznych, wyników i wniosków sformułowanych w czterech artykułach

tworzących cykl. Ostatni rozdział rozprawy zawiera wnioski końcowe, a także zarysowuje perspektywy dalszych badań.

Przedstawiona przez Doktoranta dokumentacja zawiera wszystkie wymagane dokumenty, w szczególności potwierdzenie uzyskania przez Doktoranta efektów uczenia na poziomie 8 PRK (wystawione na podstawie szczegółowej listy osiągnięć realizujących poszczególne efekty), wykaz publikacji naukowych z opisem autorskiego wkładu Doktoranta, oraz pozytywną opinię o pracy Doktoranta, przygotowaną przez promotora dra hab. Piotra Korczyka.

Mogę zatem stwierdzić, że przedłożona przez Doktoranta dokumentacja przewodu doktorskiego jest kompletna i spełnia wszystkie wymagania formalne.

3. Tematyka rozprawy, hipoteza badawcza i cele naukowe

Praca doktorska mgr inż. Damiana Zaremby poświęcona jest badaniom dwufazowych (dwie nie mieszające się ciecze) przepływów wewnętrznych w mikrokanalach. Układy mikroprzepływowe tego typu stosowane są powszechnie w takich dziedzinach, jak diagnostyka medyczna, analizy biologiczne i chemiczne, projektowanie i produkcja leków. Z poznawczego punktu widzenia interesująca jest także fizyka takich przepływów, w szczególności mikroskalowa interakcja faz generowana ruchem i napięciem powierzchniowym na powierzchniach rozdziału, a także wpływ geometrii kanałów i właściwości fizycznych ich powierzchni wewnętrznych na przepływ. Złożoność mechanizmów fizycznych i struktury takich przepływów stanowi wyzwanie zarówno dla modelowania matematycznego i numerycznego, jak i analiz eksperymentalnych. Te ostatnie stawiają wysokie wymagania co do precyzji wykonania elementów stanowiska pomiarowego, doboru gwarantującej tę precyzję metod technologicznych, a także specjalistycznego oprzyrządowania umożliwiającego sterowanie pracą urządzenia, obserwację przebiegu zjawiska i kontrolę parametrów eksperymentu.

Przegląd stanu wiedzy zamieszczony w Rozdziale 2, a także bardzo obszerna bibliografia (178 pozycji) nie pozostawiają wątpliwości, że tematyka rozprawy wpisuje się w szeroki nurt prowadzonych na świecie badań nad rozwojem szeroko pojętych technologii mikrofluidycznych. Dowodzi także znakomitej orientacji Doktoranta w tej dziedzinie, Jego zdolności do krytycznej oceny istniejących rozwiązań i modeli, oraz właściwego identyfikowania kluczowych wyzwań. Trafna diagnoza aktualnego stanu rozwoju dziedziny i antycypowanych kierunków jej rozwoju miała kluczowe znaczenia dla właściwego zdefiniowania tezy i celów badawczych rozprawy.

Mając powyższe na uwadze mogę bez wahania stwierdzić, że tematyka badawcza rozprawy doktorskiej mgr inż. Zaremby jest naukowo istotna i interesująca poznawczo. Stopień złożoności badanych zjawisk fizycznych, a także wyzwania techniczne i metodologiczne związane z ich identyfikacją i analizą, są więcej niż wystarczające dla rozprawy doktorskiej w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Aktualne i potencjalne zastosowania w medycynie, biologii i technologii chemicznej stanowią dodatkowe uzasadnienie prowadzenia przedstawionych badań i podnoszą wartość uzyskanych wyników, omówionych w dalszej części niniejszej opinii.

W Rozdziale 3 rozprawy Doktorant formułuje główną tezę rozprawy. Doktorant postuluje w niej możliwość konstrukcji dwufazowych układów mikroprzepływowych w formie systemu rozgałęzionych kanałów wyposażonych w wewnętrzne przeszkody, które są w stanie realizować funkcje logiczne i - co więcej - które można łączyć w układy złożone (sieci) zdolne do złożonych operacji na kropelkach jednej z faz. Teza ta stwierdza de facto możliwość budowy systemów mikrofluidycznych posiadających funkcjonalności analogiczne do logicznych układów elektronicznych, czyli swojego rodzaju mikrofluidycznych procesorów.

W tym samym rozdziale Doktorant formułuje szczegółowe cele badawcze, układające się w logiczną i metodologicznie poprawną sekwencję działań, spójnie powiązanych ze sformułowaną tezą badawczą. W pierwszej fazie badań Doktorant koncentruje się na analizie właściwości dynamicznych mikroprzepływów w rozważanej klasie geometrii oraz identyfikacji i opisie kluczowych zjawisk i ich mechanizmów fizycznych. Chodzi tu przede wszystkim o ustalenie zakresu stosowności pewnych uproszczeń modelowych, określenie wpływu geometrii na proces generacji kropli i ich charakterystyki geometryczne, a także mechanizmów oddziaływania kropli z umieszczonymi w kanałach przeszkodami pełniącymi rolę pułapek unieruchamiających krople lub służącymi do ich podziału. W dalszej fazie Doktorant koncentruje się na opracowaniu i analizie konfiguracji mikroprzepływowych realizujących podstawowe operacje manipulacji na kropelkach. Te elementarne konfiguracje pełnią w dalszej części badań rolę „klocków”, z których Doktorant składa układy bardziej skomplikowane, posiadające rozbudowane funkcjonalności. Zwieńczeniem wysiłków Doktoranta jest propozycja architektury i badania procesora kropelkowego, którego zadaniem jest łączenie kropelek transportujących substancję aktywną w taki sposób, aby po połączeniu uzyskać określone stężenie.

4. Ocena wartości merytorycznej pracy

Podstawą ubiegania się przez mgra inż. Damiana Zarembę o nadanie mu pierwszego stopnia naukowego jest cykl czterech publikacji w recenzowanych czasopismach naukowych z IF, a mianowicie:

- [1] Zaremba D., Błoński S., Jachimek M., Marijnissen M.J., Jakiela S., Korczyk P.M., Investigations of modular microfluidic geometries for passive manipulations on droplets, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Vol.66, No.2, pp.139-149, 2018, IF (2018): 1.361
- [2] Zaremba D., Błoński S., Marijnissen M.J., Korczyk P.M., Fixing the direction of droplets in a bifurcating microfluidic junction. *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol.23, pp.55-1-18, 2019
IF (2019): 2.489
- [3] Zaremba D., Błoński S., Korczyk P.M., Integration of capillary-hydrodynamic logic circuitries for built-in control over multiple droplets in microfluidic networks. *LAB ON A CHIP*, Vol.21, No.9, pp.1771-1778, 2021. IF (2021): 7.517
- [4] Zaremba D., Błoński S., Korczyk P.M., Concentration on demand – a microfluidic system for precise adjustment of the content of single droplets. *Chemical Engineering Journal*, Vol.430, No.3, pp.132935-1-16, 2022. IF (2022): 13.273

Są to publikacje współautorskie, ale Doktorant w każdej z nich jest pierwszym autorem. Zwraca uwagę wysoka wartość współczynnika wpływu (IF), szczególnie w dwóch najnowszych publikacjach. Zgodnie z załączoną dokumentacją, wkład Doktoranta w każdej z wymienionych publikacji był kluczowy i polegał m.in. na zaprojektowaniu i wykonaniu urządzenia mikroprzepływowego, przeprowadzeniu eksperymentów, opracowaniu i analizie wyników badań. Doktorant uczestniczył również – co oczywiste – w przygotowaniu treści wszystkich publikacji w cyklu.

Moją uwagę zwróciła publikacja [2], która dotyczy badania zachowania kropelek w rozwidleniach mikrokanalów o nietypowej, wynalezionej przez Doktoranta geometrii. Modyfikacja analizowana w tej pracy polega na zastosowaniu w rozwidleniu odpowiednio ukształtowanych szczelin umożliwiających przemieszczenie kropeł w kierunku preferowanej gałęzi oraz uniknięcie podziału długich kropeł. Co moim zdaniem szczególnie cenne, praca zawiera zarówno bogate wyniki eksperymentalne (co zawdzięczamy Doktorantowi) jak i symulacje numeryczne.

Szczególnie istotny wkład Doktoranta dostrzegam również w najnowszej w cyklu publikacji [4]. Realizacja układu mikroprzepływowego przeznaczonego do uzyskiwania kropli o dokładnie określonym stężeniu substancji aktywnej na drodze łączenia i rozdzielania kropli wymagała opracowania algorytmu manipulacji kroplami zapewniającego możliwość uzyskania pożądanego stężenia. Algorytm ten, będący oryginalnym dziełem Doktoranta jest w moim przekonaniu bardzo inteligentny, a jego realizacja w autorskim układzie mikroprzepływowym robi wielkie wrażenie.

Ważnym aspektem rozwiązań proponowanych w kolejnych artykułach cyklu jest fakt, że dotyczą one układów mikroprzepływowych nie wymagających wyrafinowanego sterowania zewnętrznego, np. przez układy cyfrowe. Innymi słowy, zaprezentowane w pracach funkcjonalności takich układów, a także stabilność i powtarzalność, wynikają z samego przebiegu zjawisk przepływowych w odpowiednio ukształtowanych geometriach. Ingerencja zewnętrzna ogranicza się do prostych manipulacji ciśnieniem zasilającym układ. Brak potrzeby stosowania złożonych układów zasilających/sterujących przekłada się na niższe koszty i większą niezawodność.

Ponieważ prace składające się na omawiany cykl zostały opublikowane w renomowanych, recenzowanych czasopismach, ich oryginalność i wartość naukowa nie podlega dyskusji. W świetle przedłożonych dokumentów, a także opinii promotora dra hab. Piotra Korczyka, nie mam wątpliwości co do kluczowej roli Doktoranta w realizację przedstawionych badań i opracowanie ich wyników.

Ze względu na przyjętą formę rozprawy, główne zadanie Doktoranta polegało na przygotowaniu jej części zawierającej opis stanu wiedzy, tezę i cele badawcze, a następnie opis zawartości merytorycznej kolejnych artykułów cyklu, ze szczególnym uwzględnieniem wkładu własnego. Ta część rozprawy liczy 42 strony, po której Doktorant zamieścił liczącą 178 pozycji bibliografię.

W mojej opinii, z tego – wbrew pozorom wcale nie łatwego – zadania Doktorant wywiązał się znakomicie. Struktura tej części pracy jest logiczna i klarowna. Bardzo właściwym posunięciem Doktoranta jest wydzielenie opisu technologii wykonania badanych układów mikroprzepływowych oraz metod pomiaru i rejestracji zjawisk przepływowych w tychże, w

formie osobnego Rozdziału 4. Obszerny Rozdział 5 zawiera opis merytoryczny badań w kolejności spójnej z postawionymi celami badawczymi i kolejności chronologicznej publikacji w cyklu. W kolejnych sekcjach tego rozdziału Doktorant opisał badania układające się w spójny i logiczny program działań, poczynając od badań nad podstawowymi mechanizmami i zjawiskami fizycznymi w układach, a skończywszy na wyrafinowanych układach bliskich zastosowaniom. Moim zdaniem, Doktorat właściwie wyważył też poziom szczegółowości opisu dostarczając czytelnikowi istotne informacje na temat koncepcji i przebiegu poszczególnych etapów badań, ale nie przytłaczając nadmierną liczbą szczegółów. Tam gdzie to było niezbędne dla jasności wyводу, Doktorant posłużył się schematami/rysunkami z oryginalnych artykułów.

W końcowym Rozdziale 6 Doktorant podsumowuje swoje badania, zasadnie stwierdzając, uzyskane wyniki realizują założone cele i potwierdzają główną tezę badawczą rozprawy. Tak niewątpliwie jest, bowiem Doktorant przedstawił tego materialne dowody w postaci działających układów mikroprzepływowych. W treści tego rozdziału Doktorant omawia także perspektywy rozwoju proponowanych rozwiązań. Zwraca uwagę na wielki potencjał technologii opartej o możliwość łączenia kropelkowych urządzeń mikroprzepływowych w systemy o rozbudowanych funkcjonalnościach. Na koniec, Doktorant wymienia podstawowe osiągnięcia naukowe rozprawy.

Za najważniejsze, oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta przedstawione w rozprawie i załączonych publikacjach uważam:

1. Zaprojektowanie koncepcji szczeliny obejściowej w rozwidleniu mikrokanálu i eksperymentalną analizę dynamiki kropeł w procesie przejścia przez rozwidlenie.
2. Opracowanie, wykonanie i analizę eksperymentalną bazowych mikroprzepływowych układów logicznych w formie sieci kanałów z lokalnymi przewężeniami (przeszkodami).
3. Zademonstrowanie możliwości łączenia bazowych układów logicznych w systemy realizujące złożone manipulacje na ciągach kropeł (licznik, permutator)
4. Opracowanie i realizacja fizyczna układów mikroprzepływowego umożliwiającego formowanie kropeł o zadanym stężeniu substancji, działających w oparciu o oryginalny, autorski algorytm manipulacji kroplami (podział i łączenie).

5. Uwagi krytyczne, zagadnienia do poruszenia w trakcie obrony

Generalnie, nie ma uwag krytycznych do rozprawy, uważam nawet, że pod wieloma względami jest to – dla tak przyjętej formy pracy doktorskiej – rozprawa wzorcowa. Jedyna uwaga dotyczy języka polskiej wersji streszczenia pracy. W mojej opinii mogłaby być napisana lepszą polszczyzną. Czytając ją miałem wrażenie, że jej treść została uzyskana metodą maszynowego tłumaczenia wersji anglojęzycznej.

Mam dwa pytania/zagadnienia i proszę, aby Doktorant odniósł się do nich w trakcie publicznej obrony:

1. Jak sformułowano warunki brzegowe w symulacjach ANSYS-owych w pracy [2]?

2. W odniesieniu do układów przygotowujących kropelki o z góry określonym stężeniu substancji – jakie ograniczenia w efektywności i precyzji zaproponowanej metody wprowadzają skale czasowe zjawiska transportu (dyfuzja, konwekcja) wewnątrz kropli?

6. Wniosek końcowy

W podsumowaniu stwierdzam, że Pan mgr inż. Damian Zeremba przedstawił rozprawę spełniającą wszystkie wymagania formalne i merytoryczne stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna, zarówno te ustawowe jak i te związane z najlepszymi praktykami prowadzenia współczesnych badań naukowych. Pan mgr inż. Zaremba przedstawił oryginalne i bardzo wartościowe osiągnięcia naukowe, stanowiące istotny wkład w rozwój mechaniki mikroprzepływów i powiązanych z nią metod eksperymentalnych. Wyniki badań przeprowadzonych przy Jego bardzo istotnym udziale mają dużą wartość poznawczą i aplikacyjną. Ich jakość i znaczenie zostało docenione przez międzynarodową społeczność naukową, czego dowodzą publikacje stanowiące podstawę wystąpienia o nadanie stopnia doktora. **Dlatego bez wahania wnioskuję o dopuszczenie Pana mgra inż. Damiana Zaremby do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Wnioskuję także o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Damiana Zaręby. Uważam, że poziom naukowy rozprawy jest zdecydowanie ponadprzeciętny, a Doktorant wykazał się wybitnymi zdolnościami do samorozwoju i predyspozycjami do prowadzenia badań naukowych. Pan mgr inż. Damian Zaremba dowiódł także swojej kreatywności, zdolności inżynierskich i wynalazczych, tak pożądaných w naukach eksperymentalnych. Zwracam także uwagę, że w dorobku Doktoranta znajdują się także inne wartościowe publikacje, związane z tematyką rozprawy.

Prof. dr hab. inż. Jacek Szumbariski

