

# Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

dr inż. Ziemowit Miłosz Malecha

Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej  
Wydział Mechaniczno – Energetyczny  
Politechnika Wrocławska  
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

30 listopada 2016

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Imię i nazwisko.</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Posiadane dyplomy oraz stopnie naukowe.</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego.</b>	<b>3</b>
4.1	Tytuł osiągnięcia naukowego. . . . .	3
4.2	Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego. . . . .	3
4.3	Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania . . . . .	6
4.3.1	Streszczenie . . . . .	6
4.3.2	Wprowadzenie . . . . .	6
4.3.3	Sposoby redukcji pierwotnego problemu obliczeniowego opierające się na analizie asymptotycznej oraz wieloskalowej . . . . .	7

*Ziemowit Malecha*

4.3.4	Modelowanie dynamicznych zagadnień ciepłno- przepływowych. Identyfikacja minimalnego modelu matematycznego. . . . .	12
4.3.5	Problemy ciepłno- przepływowe uwzględniające zjawisko nadciekłości. Implementacja nowych modeli matematycznych. . . . .	24
4.3.6	Przepływy w geometriach rzeczywistych. Przyspieszanie obliczeń poprzez wykorzystanie możliwości procesorów kart graficznych GPU. . . . .	25
<b>5</b>	<b>Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.</b>	<b>27</b>
5.1	Przebieg pracy naukowej przed osiągnięciem tytułu doktora. . . . .	27
5.2	Przebieg pracy naukowej po osiągnięciu tytułu doktora. . . . .	28
5.3	Szczególne osiągnięcia dydaktyczne i popularyzatorskie. . . . .	32
5.4	Inna współpraca naukowa . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>33</b>

## 1 Imię i nazwisko.

Ziemowit Miłosz Malecha

## 2 Posiadane dyplomy oraz stopnie naukowe.

1. **Magister inżynier**, Wydział Mechaniczno –Energetyczny, Politechnika Wroclawska, 2003, tytuł pracy magisterskiej: „Projekcyjne parametry kształtu cząstki ciała stałego”.

Praca wyróżniona na Konkursie Prac Dyplomowych z Dziedziny Mechaniki i Budowy Maszyn im. Prof. Romana Sobolskiego.

2. **Doktor nauk technicznych**, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wroclawska, 2008, tytuł rozprawy doktorskiej: „Modelowanie oddziaływań struktur wirowych ze ścianami w przepływach lepkich metodą cząstek wirowych”.

Tytuł nadany uchwałą Rady Naukowej Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wroclawskiej

(rozprawa obroniona z wyróżnieniem nadanym przez Radę Naukową Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wroclawskiej)

### **3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.**

1. 1.09.2009 – 31.08.2010, Politechnika Wrocławska, Asystent naukowo-dydaktyczny  
Urlop bezpłatny od 1.09.2009 r. do 1.03.2010 r.
2. 01.09.2009 – 31.12.2009, University of Michigan, Ann Arbor, USA, Staż podoktorski
3. 1.03.2010 – 12.03.2014, Politechnika Wrocławska, Asystent naukowo-dydaktyczny  
Urlop bezpłatny od 1.11.2010 r. do 31.01.2014 r.
4. 01.11.2010 – 31.01.2014, University of New Hampshire, Durham, USA, Affiliated Faculty (staż podoktorski)
5. od 13.03.2014, Politechnika Wrocławska, Adiunkt naukowo-dydaktyczny

### **4 Wskazanie osiągnięcia stanowiącego podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego.**

Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2013 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

#### **4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego.**

Niestandardowe modelowanie numeryczne złożonych systemów transportu ciepła i masy.

#### **4.2 Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego.**

[1] **Malecha Ziemowit M**, The numerical evaluation of safety valve size in the pipelines of cryogenic installations, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, status: praca zaakceptowana to publikacji, oczekiwany termin publikacji: ostatni kwartał 2016 lub pierwszy kwartał 2017 roku.

(Udział własny w pracy: 100%).

[2] Sandler Stanisława, Zajaczkowski Bartosz, Bialko Bogusław, **Malecha Ziemowit M**, 2017, Evaluation of the impact of the thermal shunt effect on the U-pipe ground borehole heat exchanger performance, *Geothermics*, vol. 65, s. 244-254

(Udział własny w pracy: 15%).

[3] **Malecha Ziemowit M**, Jędrusyna Artur, Grabowski Maciej, Chorowski Maciej, Weelderen Rob van, 2016, Experimental and numerical investigation of the emergency helium release into the LHC tunnel, *Cryogenics*, vol. 80, part 1, s. 17-32

(*Corresponding author*, udział własny w pracy: 50%).

[4] Bozza Gennaro, **Malecha Ziemowit M**, Weelderen Rob van, 2016, Development and application of a generic CFD toolkit covering the heat flows in combined solid-liquid systems with emphasis on the thermal design of Hi-Lumi superconducting magnets, *Cryogenics*, vol. 80, part 3, s. 253-264, DOI: 10.1016/j.cryogenics.2016.04.007

(*Corresponding author*, udział własny w pracy: 35%).

[5] **Malecha Ziemowit M**, Chini Greg, 2016, Baroclinically-driven acoustic streaming, Book of papers 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics ICTAM 2016 [Dokument elektroniczny]. s. 1-2.

(Udział własny w pracy: 50%).

[6] Chorowski Maciej, **Malecha Ziemowit M**, Poliński Jarosław, 2015, Safety related issues of the unexpected Argon release into the tunnel, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 101, art. 012160, s. 1-8.

(*Corresponding author*, udział własny w pracy: 48%).

[7] Chini Greg, **Malecha Ziemowit M**, Dreeben T. D, 2014, Large-amplitude acoustic streaming, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 744, s. 329-351

(Udział własny w pracy: 40%).

[8] **Malecha Ziemowit M**, Malecha Karol, 2014, Numerical analysis of mixing under low and high frequency pulsations at serpentine micromixers, *Chemical and Process Engineering*, vol. 35, s. 369-385

(*Corresponding author*, udział własny w pracy: 90%).

[9] **Malecha Ziemowit M**, Chini Greg, Julien Keith, 2013, A multiscale algorithm for simulating spatially-extended Langmuir circulation dynamics,

Journal of Computational Physics, 271, s. 131-150.  
(Udział własny w pracy: 60%).

[10] **Malecha Ziemowit M**, Chorowski Maciej, Poliński Jarosław, 2013, Numerical study of emergency cold helium relief into tunnel using a simplified 3D model, Cryogenics, vol. 57, s. 181-188.  
(*Corresponding author*, udział własny w pracy: 85%).

[11] **Malecha Ziemowit M**, Mirosław Łukasz, Tomczak Tadeusz, Koza Zbigniew, Matyka Maciej, Tarnawski Wojciech, Szczerba Dominik, 2011, GPU-based simulation of 3D blood flow in abdominal aorta using OpenFOAM, Archives of Mechanics, vol. 63, s. 137-161  
(*Corresponding author*, udział własny w pracy: 21%).

#### **Prace nie publikowane wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:**

[12] **Malecha Ziemowit M**, Greg Chini, Keith Julien, 2013, The Craik-Leibovich vortex force as a skin effect, Bulletin of the American Physical Society, APS Meetings: 66th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, vol. 58, no 18.  
<http://meetings.aps.org/Meeting/DFD13/Session/D10.8>  
(Udział własny w pracy: 60%).

[13] Chorowski Maciej, Poliński Jarosław, Frydrych Jarosław, **Malecha Ziemowit M**, 2011, Simulation study of helium release into the XFEL-tunnel, Raport serii SPR, Inst. Inż. Lot. Proces. Masz. Energ. Politechnika Wroclawska  
(Udział własny w pracy: 40%).

#### **Prace będące w recenzji w czasopismach naukowych, wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:**

[14] **Malecha Ziemowit M**, Poliński Jarosław, Chorowski Maciej, The evaluation of the consequences of a cistern truck accident while transporting dangerous substances through a tunnel, wysłane do: Risk Analysis, obecny status pracy: revision has been submitted, under review.  
(*Corresponding author*, udział własny w pracy: 48%).

[15] Lubryka Eliza, **Malecha Ziemowit M**, The numerical boundary conditions of the wrapping pattern of thin insulations, wysłane do: International Journal of Heat and Mass Transfer, obecny status pracy: under review.

(*Corresponding author*, udział własny w pracy: 50%).

### **4.3 Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

#### **4.3.1 Streszczenie**

Omawiane osiągnięcie naukowe skupia się na niestandardowym modelowaniu złożonych systemów transportu ciepła i masy z wykorzystaniem istniejących oraz nowatorskich technik numerycznych oraz identyfikacji możliwych uproszczeń systemu pierwotnego. Przedstawione w osiągnięciu naukowym prace można podzielić na: 1) prace, w których uproszczenie wejściowego problemu opiera się na technikach analitycznych prowadzących do zredukowanego systemu równań różniczkowych cząstkowych, których rozwiązanie wymaga użycia niestandardowych technik numerycznych (np. modele wieloskalowe); 2) prace, w których zakłada się *a-priori*, że pewne zjawiska fizyczne są nieistotne z punktu widzenia głównego celu modelowanego problemu; 3) prace, które wymagają stworzenia nowych modeli numerycznych, nieistniejących w standardowych środowiskach obliczeniowych. Powyższe pozwala na zminimalizowanie złożoności pierwotnego modelu matematycznego oraz znaczne przyspieszenie obliczeń.

#### **4.3.2 Wprowadzenie**

W latach współczesnych możliwości obliczeniowe komputerów znacząco wzrosły, jednak wiele systemów rzeczywistych, które chcielibyśmy modelować numerycznie, jest wciąż poza zasięgiem dostępnych urządzeń. Dotyczy to między innymi problemów związanych z dynamiką płynów, gdzie wraz ze wzrostem liczby Reynoldsa wzrasta ich złożoność. Wymaga to używania coraz to gęstszych siatek numerycznych, co w rezultacie uniemożliwia dalsze prowadzenie obliczeń.

Z drugiej strony, rzeczywiste zagadnienia cieplno- przepływowe mogą zawierać w sobie wiele zjawisk fizycznych występujących równolegle. Uwzględnienie ich wszystkich w obliczeniach może prowadzić do narastania wciąż nowych problemów numerycznych. Powstaje pytanie, czy błąd wynikający z próby modelowania danego zjawiska nie jest większy niż błąd wynikający z pominięcia tego zjawiska w modelu.

Wyjściem z powyższych problemów jest umiejętność uzasadnionego uproszczenia zagadnienia pierwotnego. W przypadku mechaniki płynów może to być stosowanie uśrednionych równań ruchu, uzupełnionych o tkz. modele turbulencji, w miejsce obliczeń bezpośrednich DNS (*Direct Numerical Simu-*

lations). Podejście to w wielu przypadkach znacząco przyspiesza obliczenia, lecz nie zawsze jest wystarczające.

Cykl przedstawionych prac w rozdział 4.2 skupia się na problemach dotyczących transportu masy i/lub ciepła w zaawansowanych systemach cieplno-przepływowym. Przykłady omawiane w konkretnych publikacjach mogą się wydawać czasem odległe, ale są one powiązane tym samym problemem, dużym skomplikowaniem, wymagającym niestandardowego podejścia, bądź przeprowadzenia systematycznego uproszczenia problemu pierwotnego.

Powyższe prace można podzielić na następujące kategorie:

1. Analiza problemu wejściowego opiera się na metodach analitycznych, co w sposób rygorystyczny prowadzi do zdefiniowania zredukowanych systemów równań ruchu. Może to prowadzić do konieczności stworzenia nowych algorytmów numerycznych.
2. Analiza problemu wejściowego opiera się na założeniu *a-priori*, że pewne zjawiska fizyczne są nieistotne z punktu widzenia głównego celu obliczeń. Prowadzi to do zdefiniowania minimalnego modelu matematycznego.
3. Rozpatrywany problem wymaga stworzenia nowego modelu matematycznego bądź numerycznego.

#### **4.3.3 Sposoby redukcji pierwotnego problemu obliczeniowego opierające się na analizie asymptotycznej oraz wieloskalowej**

W pracy [9] został zaproponowany wieloskalowy algorytm obliczeniowy oparty na asymptotycznej analizie multiskalowej (multiple scale asymptotic analysis). Ogólne równania ruchu (równania Navier-Stokes), zostały zredukowane do dwóch powiązanych wzajemnie układów równań. Pierwszy opisujący dynamikę uśrednioną (skala większa i wolniejsza), drugi modelujący skalę fluktuacyjną (skala mniejsza i szybsza). Dzięki temu, wszystkie skale pośrednie zostały odfiltrowane z modelu, jako nieistotne dla rozważanego problemu, co znacząco zredukowało złożoność problemu pierwotnego.

Powyższa metoda opiera się na przeprowadzeniu następujących kroków:

- Zdefiniowaniu charakterystycznych skal czasowych i przestrzennych występujących w danym systemie, co prowadzi do zdefiniowania odpowiednich równań bezwymiarowych, wraz z odpowiednimi liczbami bezwymiarowymi.
- Zdefiniowaniu parametru asymptotycznego  $\delta$ , i zdefiniowaniu wszystkich liczb bezwymiarowych jako funkcji  $\delta$  (*asymptotic distinguished limit*).

- Formalnym wprowadzeniu dwóch skal, wolnej i szybkiej, dla czasu:  $T \equiv \delta t$  lub/ oraz dwóch skal przestrzennych, dużej (uśrednionej) oraz małej (fluktuacyjnej):  $Y \equiv \delta y$ .
- Przekształceniu równań pierwotnych poprzez wprowadzenie różniczkowania wieloskalowego:  $\partial_t \rightarrow \partial_t + \delta \partial_T$  oraz/ lub  $\partial_y \rightarrow \partial_y + \delta \partial_Y$  oraz zastosowaniu dekompozycji na zmienne uśrednione i fluktuacyjne:  $f(Y, z, T) \sim \bar{f}(Y, z, T) + f'(y, Y, z, t, T)$  (w powyższym przykładzie zmienna przestrzenna  $z$  nie jest uwzględniona w analizie).
- Przeprowadzeniu analizy asymptotycznej:  $\delta \rightarrow 0$ .
- Rozwinięciu zmiennych zależnych w szereg asymptotyczny i odrzuceniu wyrazów asymptotycznie małych.

Dzięki temu równania w formie pierwotnej, zawierające wszystkie możliwe skale:

$$\begin{aligned}
D_t u - \delta R o^{-1} v &= L a (\partial_y^2 + \partial_z^2) u \\
D_t v + \delta R o^{-1} (u + S U_s) &= -\partial_y p + S U_s \partial_y u + L a (\partial_y^2 + \partial_z^2) v \\
D_t w &= -\partial_z p + S U_s \partial_z u + R i b + L a (\partial_y^2 + \partial_z^2) w \\
D_t b &= P r^{-1} L a (\partial_y^2 + \partial_z^2) b \\
\partial_y v + \partial_z w &= 0, \text{ gdzie } D_t \equiv \partial_t + v \partial_y + w \partial_z.
\end{aligned} \tag{1}$$

zostają zredukowane do dwóch powiązanych ze sobą układów równań, opisujących odpowiednio skalę uśrednioną (dużą i wolną):

$$\begin{aligned}
\bar{D}_T \bar{u} + \partial_Y (\overline{v' u'}) + \delta^{-1} \partial_z (\overline{w' u'}) - R o^{-1} \bar{v} &= \bar{L} a \partial_z^2 \bar{u} \\
\bar{D}_T \bar{v} + \partial_Y (\overline{v' v'}) + \delta^{-1} \partial_z (\overline{w' v'}) + R o^{-1} (\bar{u} + S U_s) &= -\partial_Y \bar{p} + S U_s \partial_Y \bar{u} + \bar{L} a \partial_z^2 \bar{v} \\
0 &= -\partial_z \bar{p} + R i \bar{b} + S U_s \partial_z \bar{u} - \partial_z (\overline{w' w'}) \\
\bar{D}_T \bar{b} + \partial_Y (\overline{v' b'}) + \delta^{-1} \partial_z (\overline{w' b'}) &= P r^{-1} \bar{L} a \partial_z^2 \bar{b} \\
\partial_Y \bar{v} + \partial_z \bar{W} &= 0; \text{ gdzie } \bar{D}_T \equiv \partial_T + \bar{v} \partial_Y + \bar{W} \partial_z
\end{aligned} \tag{2}$$

oraz skalę fluktuacyjną (małą i szybką):

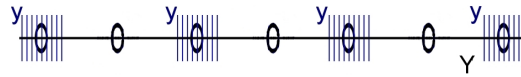
$$\begin{aligned}
D'_t u' + w' \partial_z \bar{u} &= L a (\partial_y^2 + \partial_z^2) u' \\
D'_t v' + w' \partial_z \bar{v} &= -\partial_y p' + S U_s \partial_y u' + L a (\partial_y^2 + \partial_z^2) v' \\
D'_t w' - \partial_z (\overline{w' w'}) &= -\partial_z p' + S U_s \partial_z u' + R i b' + L a (\partial_y^2 + \partial_z^2) w' \\
D'_t b' + w' \partial_z \bar{b} &= P r^{-1} L a (\partial_y^2 + \partial_z^2) b' \\
\partial_y v' + \partial_z w' &= 0; \text{ gdzie } D'_t \equiv \partial_t + (\bar{v} + v') \partial_y + w' \partial_z
\end{aligned} \tag{3}$$

gdzie  $\overline{(\cdot)}$  oznacza zmienną uśrednioną względem zmiennej fluktuacyjnej przestrzennej  $y$  oraz czasowej  $t$ , natomiast znak „'” oznacza zmienną fluktuacyjną z zerową wartością średnią ( tzn.  $f' = 0$ ).



Bezwymiarowe parametry:  $La \sim Re^{-1}$ ,  $Ro$ ,  $Ri$  oznaczają odpowiednio bezwymiarowe liczby Langmuira, Rossbiego oraz Richardsona, natomiast  $U_s$  opisuje profil prędkości Stokesa (opisujący uśredniony ruch pochodzący od fal powierzchniowych).

Rozseparowanie pierwotnego problemu na skalę uśrednioną i fluktuacyjną pozwala w znacznym stopniu skrócić czas obliczeń, poprzez znaczne zredukowanie ilości węzłów obliczeniowych. Równania uśrednione, opisujące ewolucję w dłuższej skali czasowej pozwalają na użycie znacznie rzadszych siatek, natomiast równania opisujące dynamikę fluktuacyjną wystarczy rozwiązać tylko w ograniczonych pod-obszarach. Schematycznie przedstawia to rysunek, 1. Opisana powyżej metoda może być z powodzeniem stosowana w dowolnych

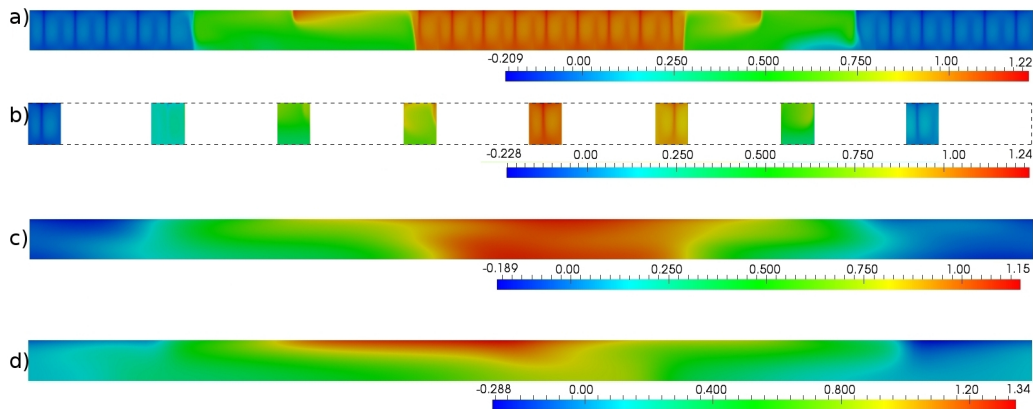


Rysunek 1: Schemat modelu wieloskalowego. Równania dynamiki uśrednionej są rozwiązywane na siatce rzadkiej (zmienna  $Y$ ), natomiast równania dynamiki fluktuacyjnej są rozwiązywane na pod-obszarach (zmienna  $y$ ), znajdujących się w otoczeniu węzłów siatki rzadkiej.

systemach ciepłno- przepływowych w których występuje naturalna separacja skal. Przykładem może być modelowanie ruchu atmosfery bądź oceanu. Siły zewnętrzne: siła Coriolisa, siła wyporu, czy siła naprężeń stycznych pochodzących od wiatru, sprzyjają tworzeniu się dobrze zdefiniowanych skal wielkości. Rysunek 2 przedstawia przykładowe rozwiązanie dla górnej warstwy (warstwy granicznej) oceanu, gdzie w większej skali dominuje ruch wywołany różnicą temperatur, natomiast w mniejszej skali ruch wywołany jest wiatrem. Obrazek a) przedstawia rozwiązanie równań pełnych (1) metodą DNS, obrazek b) przedstawia sumę rozwiązań równań (2) i (3), obrazek c) przedstawia rozwiązanie równań (2), natomiast obrazek d) przedstawia rozwiązanie równań (2) ale bez członów odpowiedzialnych za przekazywanie informacji ze skali fluktuacyjnej.

Widać, że w przypadku metody wieloskalowej ilość oczek siatki ogranicza się do sumy oczek siatki obszaru skal większych (rzadka siatka) oraz pewnej ilości niezależnych od siebie pod-obszarów, gdzie rozwiązywane są równania dla skali fluktuacyjnej. Sumarycznie ilość oczek siatki w odpowiadającym rozwiązaniu DNS może być o rząd wielkości większa, poza tym niezależność pod-obszarów fluktuacyjnych gwarantuje najbardziej optymalną możliwość do zrównoleglenia obliczeń.

W pracach [5, 7] podobna analiza została przeprowadzona do identyfikacji i wyjaśnienia mechanizmu tworzenia się zjawiska silnego streamingu akustycz-



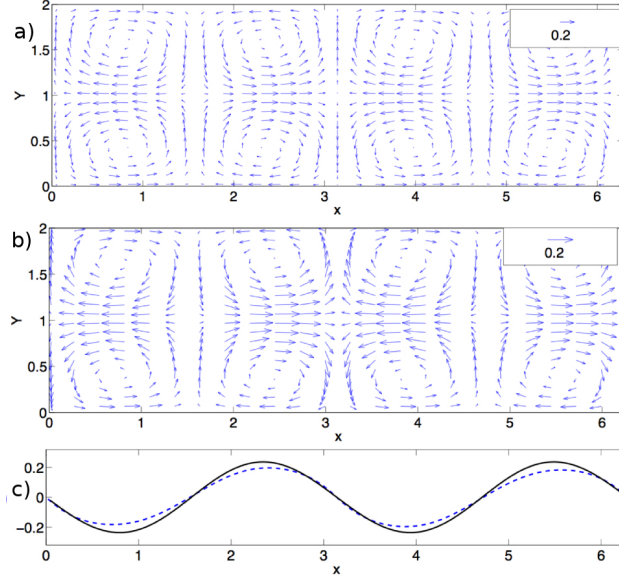
Rysunek 2: Wynik symulacji wieloskalowej w warstwie granicznej oceanu, mapa kolorów przedstawia wartość wirowości. Dokładny opis w tekście.

nego w żarówkach typu HID (high intensity discharge lamps). Streaming akustyczny jest uśrednionym przepływem wytworzonym przez stojącą falę akustyczną o wysokiej częstotliwości poruszającą się w płynie. Mimo iż, ruch fali jest symetryczny, nieliniowa natura dynamiki płynów powoduje powstanie nie-zerowego przepływu średniego, zwanego streamingiem. W klasycznym przypadku ten przepływ średni jest wiele rzędów mniejszy od amplitudy wywołującej go fali (klasyczny streaming Rayleigha) oraz jest wywołany siłami lepkościowymi sprzyjającymi powstawaniu naprężeń Reynoldsa w okolicach ścianek.

Wewnątrz żarówek HID występuje duży gradient temperatur, między ścianką a jej środkiem, gdzie znajduje się łuk elektryczny. Powoduje to niestabilną pracę łuku spowodowaną pojawieniem się niepożądanych ruchów związanych z siłą wyporu. Sposobem poradzenia sobie z tym problemem okazało się wywołanie wewnątrz żarówki stojącej fali akustycznej powodującej powstanie streamingu będącego w stanie przeciwdziałać siłom wyporu. Zaskakujące było to, iż wartość streamingu była dużo większa niż wynikałoby to z klasycznej teorii Rayleigha.

Przedstawiona w pracy analiza asymptotyczna oraz analiza wieloskalowa pozwoliła wyjaśnić mechanizm tego nie klasycznego streamingu. Pokazano, że mechanizm ten jest w zasadzie nie lepki oraz, że naprężenia Reynoldsa są wywołane baroklinicznie (linie stałego ciśnienia i stałej gęstości nie pokrywają się co powoduje tworzenie się wirowość). Ponadto, dla pewnych granicznych wartości parametrów, możliwa była dalsza analiza prowadząca do dalszych uproszczeń problemu, a nawet do analitycznego rozwiązania, pokazująca, że wartość przepływu średniego jest niezależna od częstotliwości fali go wywołującej. Jest to sprzeczne z teorią klasyczną. Rysunek 3 przedstawia

rozwiązanie DNS omawianego problemu, oraz rozwiązanie równań uproszczonych. Możliwość przewidywania i kontrolowania streamingu baroklinicznego



Rysunek 3: Przepływ uśredniony (*streaming*) w lampie HID wywołany stojącą falą akustyczną o wysokiej częstotliwości: a) rozwiązanie DNS, b) rozwiązanie modelu zredukowanego, c) porównanie a) i b) dla  $u(x, Y = 0)$ .

jest szczególnie interesujące ze względu na możliwość efektywnego i cichego chłodzenia urządzeń elektronicznych. W licznych pracach doświadczalnych i obliczeniowych zostało pokazane, że istnienie silnego streamingu znacząco intensyfikuje wymianę ciepła, lecz nie zdawano sobie sprawy z mechanizmu go wywołującego.

W pracy [12] została użyta metoda dopasowania asymptotycznego (Method of matched asymptotic expansions) do systematycznego uproszczenia zagadnienia pierwotnego, poprzez wyprowadzenie efektywnych warunków brzegowych (EBC).

Podobnie jak w pracy [9] punktem wyjściowym były równania Naviera-Stokesa uzupełnione o efekt Stokesa (równania Craik-Leibovicha):

$$\begin{aligned}
 D_t u &= Re_s^{-1} (\partial_y^2 + \partial_z^2) u \\
 D_t v &= -\partial_y p + U_s \partial_y u + Re_s^{-1} (\partial_y^2 + \partial_z^2) v \\
 D_t w &= -\partial_z p + U_s \partial_z u + Re_s^{-1} (\partial_y^2 + \partial_z^2) w \\
 \partial_y v + \partial_z w &= 0, \text{ gdzie } D_t \equiv \partial_t + v \partial_y + w \partial_z.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Warunki brzegowe:  $La \partial_z u = \tau$

Wyrazy  $U_s \partial_y u$  oraz  $U_s \partial_z u$  uwzględniają dodatkową siłę działającą na system, pochodzącą od uśrednionego ruchu fal powierzchniowych, gdzie  $U_s$  oznacza profil prędkości Stokesa.

W warunkach rzeczywistych obserwuje się, że profil prędkości Stokesa bardzo szybko maleje do zera wraz z głębokością. Jest on często aproksymowany funkcją eksponencjalną  $U_s = e^{\beta z}$ , gdzie parametr  $\beta \gg 1$  ( $z \leq 0$ ). Pozwala to na przeprowadzenie analizy asymptotycznej w oparciu o parametr  $\beta$  i w efekcie przenieść siłę związaną z prędkością Stokesa, z równań ruchu (4) do warunków brzegowych. Ostatecznie otrzymujemy zredukowane równania ruchu uzupełnione o efektywne warunki brzegowe:

$$\begin{aligned} D_t u &= Re_s^{-1} (\partial_y^2 + \partial_z^2) u \\ D_t v &= -\partial_y p + Re_s^{-1} (\partial_y^2 + \partial_z^2) v \\ D_t w &= -\partial_z p + Re_s^{-1} (\partial_y^2 + \partial_z^2) w \\ \partial_y v + \partial_z w &= 0, \text{ gdzie } D_t \equiv \partial_t + v \partial_y + w \partial_z. \end{aligned} \quad (5)$$

EBC:  $\partial_z u \sim 1$ ,  $\partial_z v = \frac{1}{La\beta} (\partial_y u - \partial_x v)$

Metoda przedstawiona w powyższej pracy może być uogólniona do każdego systemu cieplno- przepływowego, gdzie obecne są silne efekty powierzchniowe, które mogą lokalnie wymagać znacząco zagęszczonej siatki numerycznej. Dzięki możliwości przeniesienia tego efektu do warunku brzegowego wydaje się możliwe użycie rzadszych siatek numerycznych. Rysunek 4 przedstawia przykładowe porównanie rozwiązania zagadnienia pierwotnego (4) oraz zagadnienia zredukowanego (5).

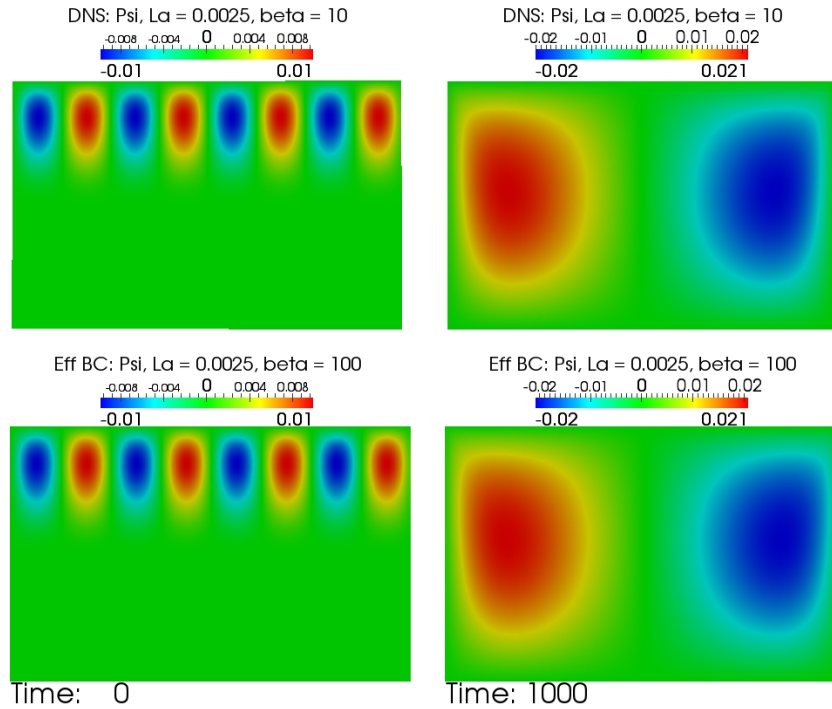
#### *Podsumowanie*

Przewodnim celem wyżej wymienionych prac było użycie metod analitycznych do uproszczenia problemu pierwotnego poprzez systematyczne poszukiwanie dominującego balansu sił obecnego w rozpatrywanym przepływie oraz separacji skal. Wejściowe systemy równań różniczkowych cząstkowych zostały zredukowane do form uproszczonych co dało dwojaki zysk. Możliwe było rozwinięcie i zastosowanie nowatorskich oraz mniej kosztownych obliczeniowo algorytmów numerycznych, oraz możliwy był wgląd w naturę rozpatrywanego problemu i w mechanizmy nim sterujące.

Ważne jest aby podkreślić, że przedstawione metody są uniwersalne, a przykłady obliczeniowe będące ich motywacją, potwierdziły ich skuteczność.

#### **4.3.4 Modelowanie dynamicznych zagadnień cieplno- przepływowych. Identyfikacja minimalnego modelu matematycznego.**

Celem cyklu prac [3, 10, 13] była identyfikacja modelu matematycznego odpowiedniego do symulacji nagłych wpływów helu o temperaturze kriogenicz-



Rysunek 4: Porównanie rozwiązania DNS oraz rozwiązania zredukowanego z efektywnymi warunkami brzegowymi (EBC) dla parametrów:  $La = 0.0025$  oraz  $\beta = 10$ . Mapa kolorów przedstawia wartości funkcji prądu  $\psi$ .

nej do ciepłego otoczenia oraz przeprowadzenie serii obliczeń numerycznych pozwalających w sposób wiarygodny oszacować wiążące się z tym zagrożenie. Nagłe i niespodziewane wyrzucenie dużych ilości gazów kriogenicznych do dużych przestrzeni (np. tunele akceleratorów cząstek XFEL, LHC) może mieć bardzo niebezpieczne konsekwencje, zarówno dla urządzeń tam się znajdujących jak i dla przebywającego personelu. Istnieje ekstremalnie niskich temperatur oraz bardzo dużych gradientów temperatur, powoduje, że taki przepływ przebiega niezmiernie dynamicznie. Ponadto równolegle dochodzi do wielu zjawisk fizycznych i próba uwzględnienia ich wszystkich w modelu matematycznym może być bardzo trudna.

Dlatego pracę nad definiowaniem modelu matematycznego należy rozpocząć od identyfikacji niezbędnych jego składowych oraz od zdefiniowania celu jaki dany model ma spełniać. W przypadku omawianych prac celem nadrzędnym była możliwość przewidywania koncentracji helu w tunelu, szybkości propagacji chmury helowo-powietrznej oraz tworzenia się stratyfikacji. Stawiając sobie za cel stworzenie modelu minimalnie skomplikowanego, aby zapewnić stabilniejszą pracę numeryczną oraz szybsze obliczenia, oraz ana-

lizując właściwości fizyczne i termodynamiczne poszczególnych składników biorących udział w przepływie, założono:

- W związku z istnieniem dużych różnic gęstości, przepływ powinien uwzględniać efekty związane ze ściśliwością gazów. Do modelowania transportu masy wybrano ściśliwe równania Naviera-Stokesa:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{g} \rho \quad (6)$$

gdzie  $\mathbf{g}$  oznacza przyspieszenie grawitacyjne, natomiast zasada zachowania masy jest zapewniona poprzez uwzględnienie równania ciągłości:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

- Proces mieszania się składników biorących udział w przepływie może być modelowany równaniem dyfuzyjno-adwekcyjnym dla każdego składnika osobno:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) = \nabla \cdot (\mu \nabla Y_i) \quad (8)$$

gdzie  $Y_i$  oznacza udział masowy  $i$ -tej substancji (gazu),  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  jest wektorem prędkości,  $\rho$  jest gęstością mieszaniny,  $\mu$  jest lepkością mieszaniny oraz zachodzi:  $\sum Y_i = 1$ .

- Własności mieszaniny, takie jak gęstość  $\rho$ , ciepło właściwe  $C_p$ , przewodność cieplna  $k$  oraz lepkość  $\mu$  mieszają się zgodnie z proporcjonalną zasadą addytywności. Jest to właściwe podejście dla wszystkich tych wielkości poza lepkością. Mimo to użycie tej zasady w przypadku lepkości może być traktowane jako zgrubne, lecz w wielu przypadkach wystarczające przybliżenie, które upraszcza model matematyczny:

$$\rho = \sum Y_i \rho_i, \quad C_p = \sum Y_i C_{pi}, \quad k = \sum Y_i k_i, \quad \mu = \sum Y_i \mu_i \quad (9)$$

- Mimo iż, hel w niskich temperaturach odbiega od zachowania opisanego równaniem stanu gazu doskonałego, obliczenia próbne, pokazały, że efekt ten jest pomijalnie mały, dlatego na potrzeby identyfikacji minimalnego modelu matematycznego założono, że zarówno hel jak i powietrze zachowują się jak gazy doskonałe:

$$\rho_i = \frac{p}{T R_i} \quad (10)$$

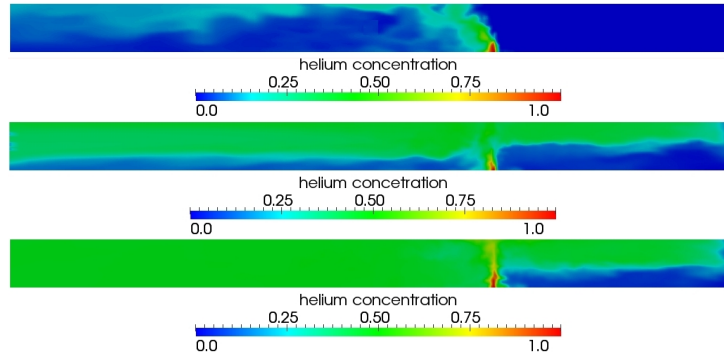
- Mimo iż,  $C_p$  zmienia się wraz z temperaturą, szczególnie gwałtownie w obszarze temperatur niskich, jednak dla większości zakresu rozpatrywanych temperatur ( $4K < T < 300K$ ) ma przebieg zbliżony do stałego. Aby wyeliminować niekorzystne efekty numeryczne związane z dużym gradientem  $C_p$  w obszarach niskich temperatur, założono, że  $C_p = const$ , zarówno dla helu jak i powietrza. Obliczenia próbne, w których przeanalizowano oba przypadki:  $C_p = f(T)$  oraz  $C_p = const$ , potwierdziły minimalny wpływ założenia stałości  $C_p$  na wyniki.
- Zmiana temperatury mieszaniny została policzona poprzez rozwiązanie równania transportu entalpii:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} h) = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot \left( \frac{k}{C_p} \nabla h \right) \quad (11)$$

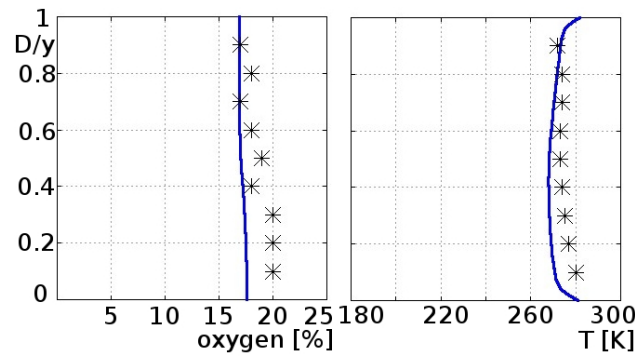
- W modelu założono, że efekty przemiany fazowej (np. kondensacja pary wodnej) są pomijalnie małe. Jest to uzasadnione w szczególności w przypadku definiowania minimalnego modelu matematycznego, gdyż model przemiany fazowej oraz jego numeryczna implementacja, zazwyczaj prowadzi do mniej stabilnych numerycznie algorytmów, co wymusza rozwiązywanie z mniejszym krokiem czasowym oraz wprowadza dodatkowe błędy numeryczne. Porównanie zaproponowanego modelu z wynikami eksperymentalnymi potwierdziły poprawność tego założenia.

Przeprowadzenie serii obliczeń numerycznych i porównanie ich z wynikami eksperymentalnymi dało pewność, że zaproponowany model matematyczny jest wystarczająco dobry do modelowania omawianej klasy zagadnień. Rysunek 5 przedstawia wyniki numeryczne przedstawione w pracy [10], które przedstawiają różne reżimy przepływów ze względu na występującą stratyfikację. Wyniki te są zbieżne z eksperymentem laboratoryjnym omawianym w tej pracy. Natomiast rysunek 6 przedstawia przykładowe wyniki porównujące zawartości tlenu i temperaturę mieszaniny w pewnej odległości od miejsca wyrzutu helu do tunelu laboratoryjnego. Więcej szczegółów, oraz przykładowe obliczenia trójwymiarowe, wraz z definicją funkcji opisujących zachowanie chmury helowo-powietrznej w zależności od wybranych parametrów przepływu są omówione w dalszej części pracy [10].

Praca [3] stanowi niejako rozwinięcie poprzedniej pracy. W tym przypadku zaproponowany model został użyty do symulacji wyrzutu kriogenicznego helu do tunelu LHC w CERN. Wiarygodność modelu została podparta szczegółowym porównaniem z eksperymentem przeprowadzonym w tunelu LHC (patrz II.J3, załącznik 3).



Rysunek 5: Wyływ zimnego helu do tunelu dla różnych parametrów przepływu. Widoczne są trzy różne reżimy przepływu ze względu na rodzaj stratyfikacji. Mapa kolorów przedstawia udział objętościowy helu w tunelu. Przykładowe wyniki z pracy [10].

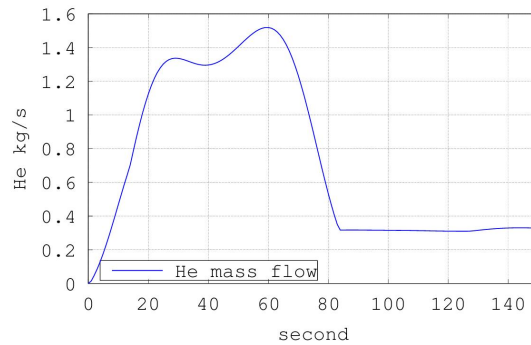


Rysunek 6: Szczegółowe porównanie wyników numerycznych (linia ciągła) z danymi eksperymentalnymi (punkty/gwiazdki) dla strumienia masy helu  $q_{He} = 3 \text{ g/s}$  oraz prędkości średniej powietrza wentylacyjnego  $U_{air} = 0.5 \text{ m/s}$ . Wyniki pokazują koncentracje tlenu oraz temperaturę w odległości 10 średnic od miejsca wyrzutu helu. Przykładowe wyniki z pracy [10].

Przeprowadzenie obliczeń dla tunelu LHC było wyzwaniem ze względu na rozmiar tunelu, jego trójwymiarową charakterystykę oraz dużą ilość wyrzuczonego helu. Wymagało to świadomego doboru modelu turbulencji wraz z odpowiednimi funkcjami ścianki. Zostało pokazane, że model turbulencji typu  $k\text{-}\Omega\text{SST}$  dał lepsze wyniki niż klasyczny model  $k - \epsilon$ .

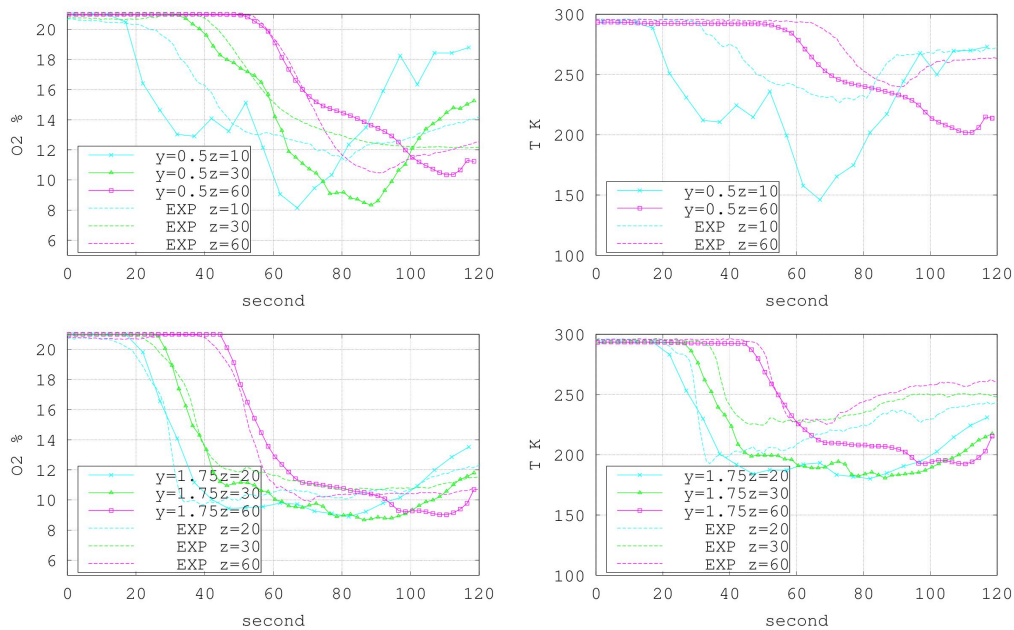
Rysunek 7 przedstawia strumień masy helu wydostającego się do tunelu w czasie. Na podstawie wyników eksperymentalnych, oszacowano że jego temperatura początkowa wynosiła  $5K$ . Rysunek 8 przedstawia szczegółowe porównanie wyników eksperymentalnych oraz numerycznych. Widać, że za-





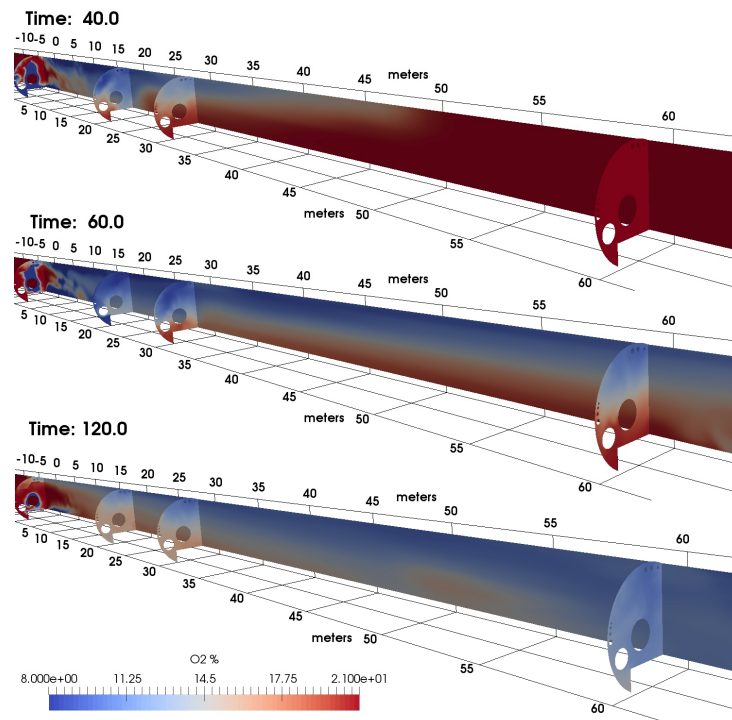
Rysunek 7: Strumień masowy helu w czasie, wyrzucanego do tunelu LHC podczas omawianego eksperymentu.

proponowany model jest w stanie dobrze przewidzieć koncentrację tlenu oraz szybkość propagacji chmury helowo-powietrznej. Natomiast rysunek 9 przed-



Rysunek 8: Porównanie wyników modelu numerycznego z danymi eksperymentalnymi. Przykładowe wyniki z pracy [3].

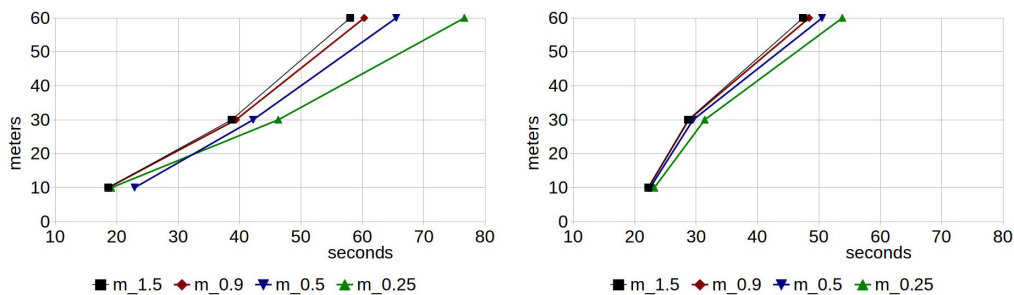
stawia stężenie tlenu w tunelu LHC dla różnych czasów. Można zaobserwować początkową, krótkotrwałą stratyfikację, po czym cały przekrój tunelu wypełnia się mieszaniną gazową o niemalże równomiernym stężeniu tlenu. Zdefiniowanie poprawnego modelu matematycznego pozwoliło na przeprowa-



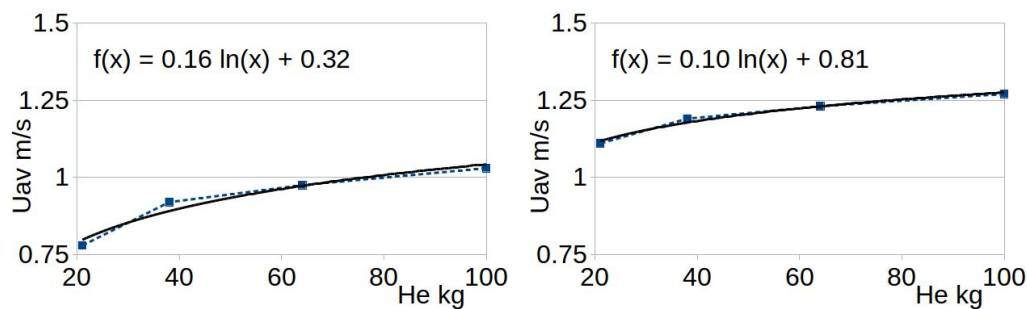
Rysunek 9: Wyniki numeryczne pokazujące przepływ w tunelu LHC w czasie, bazujące na rozwiązanym modelu. Kolejne obrazki przedstawiają koncentrację tlenu w wybranych przekrojach tunelu. Lewy przekrój pionowy, dla  $z = 0$  m, przechodzi przez miejsce wyrzutu helu. Dla początkowych czasów można zaobserwować, że cięższy od powietrza hel porusza się w kierunku podłogi, ale po krótkim czasie ogrzewa się i zaczyna poruszać się w kierunku sufitu. Przykładowe wyniki z pracy [3].

dzenie serii obliczeń dla różnych strumieni masy helu, co pozwoliło przebadać szerokie spektrum przestrzeni parametrów oraz zbadać charakterystykę tunelu LHC. Przykładowe wyniki, prezentujące zmianę szybkości propagacji chmury w zależności od strumienia masy helu, są przedstawione na rysunku 10. Widać iż prędkość propagacji helu ma charakter logarytmiczny co można zaobserwować na rysunku 11.

Poza licznymi wynikami i wnioskami przedstawionymi w pracy [3], analiza numeryczna pokazała, także że początkowa temperatura helu, oraz rozmiar otworu przez który hel dostaje się do tunelu, może mieć kluczowy wpływ na tworzenie się stratyfikacji lub jej brak. W przypadku eksperymentu przeprowadzonego w tunelu LHC nie obserwowano stratyfikacji, patrz rysunek 8, ponieważ prędkość wyrzutu helu była nieznaczna i hel początkowo opadał



Rysunek 10: Propagacja chmury hel-powietrze w tunelu LHC (CERN). Poszczególne krzywe odpowiadają innemu strumieniowi masy helu wyrzucanego do tunelu. Lewy wykres: wyniki dla 0.5 m nad podłogą tunelu, prawy wykres: wyniki dla 1.75 m nad podłogą tunelu. Założono, że czoło chmury zaczyna się dla granicy 20 % zawartości tlenu. Przykładowe wyniki z pracy [3].



Rysunek 11: Średnia prędkość propagacji chmury hel-powietrze wyznaczonej 60 m od miejsca wyrzutu helu. Lewy (prawy) wykres przedstawia wyniki dla 0.5 m (1.75 m) nad podłogą tunelu. Przykładowe wyniki z pracy [3].

w kierunku podłogi, aby dopiero po chwili, gdy jego gęstość zmniejszyła się poniżej gęstości otaczającego go powietrza, unosił się szybko w kierunku sufitu. Jednak obliczenia numeryczne pokazały, że stratyfikacja jest możliwa, gdy hel będzie wyrzucany w formie silnego jetu w kierunku sufitu tunelu.

W pracy przedstawiono także możliwość systematycznego uproszczenia geometrii trójwymiarowej i zastąpienie jej modelem dwuwymiarowym. Dzięki czemu obliczenia mogą być znacznie szybsze. Porównanie wyników obliczeń dwuwymiarowych z eksperymentem, także potwierdziło poprawność takiego podejścia.

Zaproponowany model matematyczny w pracach [3, 10] jest uniwersalny i może być stosowany dla innych substancji kriogenicznych i warunków prze-

pływu. W pracach [6, 14] oraz projekcie [II.J4 - Zał. 3] podobny model został użyty do symulacji propagacji argonu w tunelu kopalni. W tym przypadku ważne było także opracowanie odpowiedniego warunku brzegowego definiującego wypływ argonu do obszaru obliczeniowego.

Źródłem argonu w tunelu była uszkodzona cysterna, w której znajdował się argon w postaci ciekłej. Po oszacowaniu pola przekroju otworu w uszkodzonej cysternie oraz strumienia argonu ciekłego, możliwe było oszacowanie pola przekroju zastępczego dla odpowiadającego strumienia masy argonu gazowego. Było to możliwe dzięki oszacowaniu, strumienia ciepła z podłoża tunelu do argonu ciekłego oraz szybkości jego odparowania. Dzięki temu zaproponowany model numeryczny został uproszczony poprzez wyeliminowanie modelu przemiany fazowej argonu.

Przeprowadzone badania pokazały, że reżim przepływu w istotnej mierze zależy od intensywności wentylacji tunelu kopalni oraz od kąta nachylenia tunelu. Chmura argonowo-powietrzna może poruszać się w górę, w dół tunelu, lub utrzymywać się przez dłuższy czas w jednym miejscu. Dzięki temu zostały zidentyfikowane możliwe procedury bezpieczeństwa w zależności od sytuacji w tunelu. Możliwa jest różna reakcja, w zależności czy bardziej pożądane jest aby argon został przekierowany w górę bądź w dół tunelu.

Praca [14] jest zasadniczym rozszerzeniem pracy [6], gdzie przeprowadzona analiza numeryczna została dopasowana do oszacowania następstw wypadku cysterny przewożącej niebezpieczne substancje w tunelu drogowym.

Praca [1], podobnie jak prace omówione powyżej, wpisuje się także w tematykę bezpieczeństwa oraz szacowania następstw niebezpiecznych zdarzeń oraz możliwości ich przeciwdziałania. W przypadku pracy [1] uwaga została zwrócona na problem nagłego wzrostu ciśnienia w kriogenicznych przewodach rurowych, o znacznej długości, na skutek nagłego dopływu ciepła spowodowanego uszkodzeniem izolacji.

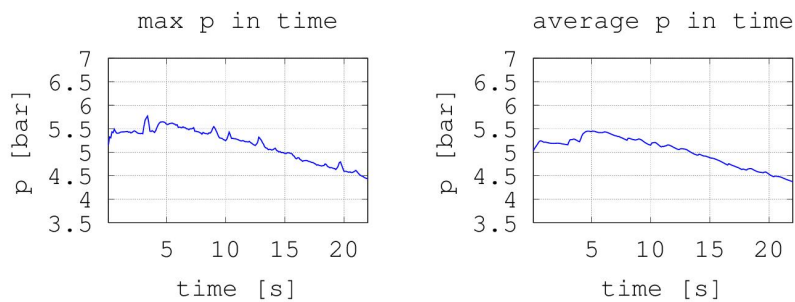
Głównym celem pracy był dobór odpowiedniego modelu matematycznego i narzędzi numerycznych umożliwiających modelowanie bardzo dynamicznych procesów cieplno- przepływowych oraz oszacowanie minimalnego przekroju zaworu bezpieczeństwa, który będzie w stanie zapobiec wzrostowi ciśnienia w rurociągu powyżej zadanej wartości.

Głównym wyzwaniem była konieczność stworzenia modelu numerycznego dla bardzo długich przewodów rurowych, rzędu setek metrów oraz konieczność przeprowadzania wielu serii obliczeń, ze względu na konieczność doboru rozmiaru zaworu metodą *prób i błędów*.

Wymagało to opracowania odpowiedniej metodologii transformacji rzeczywistej trójwymiarowej geometrii do jej dwuwymiarowej reprezentacji, z zachowaniem wszystkich kluczowych cech przepływu. Szczególna trudność wiązała się także z możliwością powstania fali uderzeniowej na skutek nagłego otwar-

cia zaworu bezpieczeństwa dlatego w pracy zdecydowano się użyć schematu dyskretyzacji typu *upwind*, który zachowuje stabilność w przypadku pojawienia się znaczących gradientów w przepływie.

Rysunek 12 przedstawia przykładowe wyniki przedstawione w pracy [1], pokazujące wzrost ciśnienia w rurociągu w czasie. Użyte w tym przypadku zawory bezpieczeństwa zapobiegły wzrostowi ciśnienia powyżej 6bar.

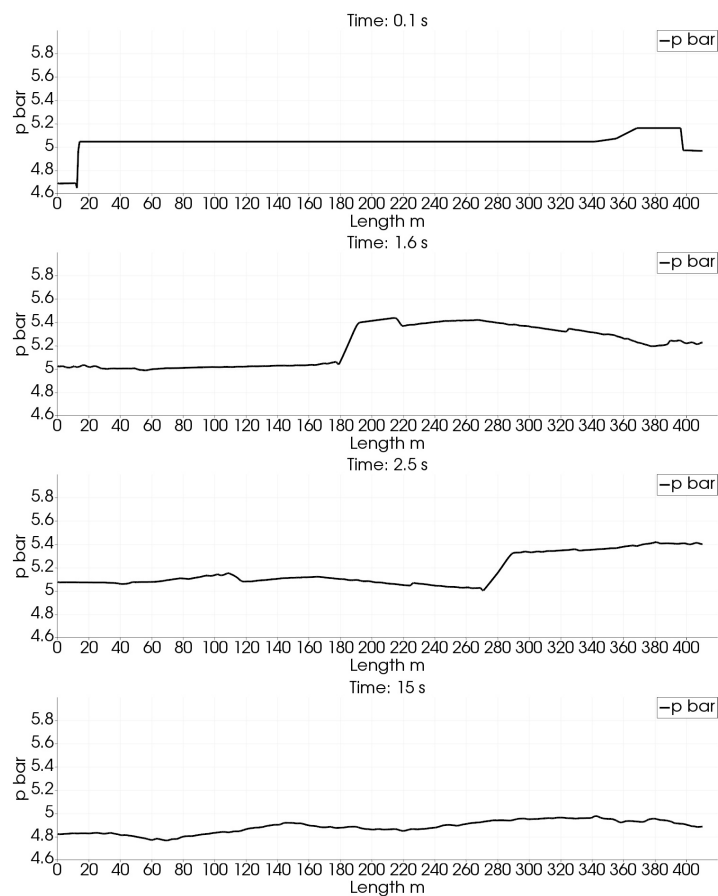


Rysunek 12: Wzrost ciśnienia w czasie dla rurociągu składającego się z dwóch przewodów rurowych o różnej średnicy i o łącznej długości 410 metrów. Zastosowane zaworów o odpowiednio dobranej średnicy pozwoliło zapobiec nadmiernemu wzrostowi ciśnienia.

Natomiast rysunek 13 przedstawia falę uderzeniową poruszającą się przeciwnie do kierunku przepływu, powstałą na skutek nagłego otwarcia zaworów bezpieczeństwa.

Metodologia opisana w pracy [1] jest uniwersalna i może być zastosowana dla rurociągów o dowolnej długości i dowolnej ilości zmian średnic. Pozwala na dobór minimalnego przekroju jakie powinno mieć urządzenie zabezpieczające przed nagłym wzrostem ciśnienia powyżej zadanej wartości.

W pracy [8] zaproponowany został model matematyczny do analizy efektywności mieszania w miniaturowych mieszalnikach wykonanych w technologii LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics). Cechą charakterystyczną tych mikro-mieszalników jest brak części ruchomych, mieszanie odbywa się poprzez bezpośredni kontakt dwóch substancji, które płyną przez system mikro-kanałów o zadanym kształcie. Ponieważ przepływ charakteryzuje się bardzo niską liczbą Reynoldsa, mieszanie może odbywać się tylko na zasadzie dyfuzyjnej. Znacząco wydłuża to proces mieszania, dlatego stosuje się różnego rodzaju zabiegi, mające na celu wywołanie „sztucznej” turbulencji, a przez to zwiększenie rozmiaru obszaru styku mieszających się substancji. Intensyfikacja mieszania może odbywać się pasywnie poprzez maksymalne wydłużenie drogi przepływu i czasu kontaktu substancji poprzez wykonanie

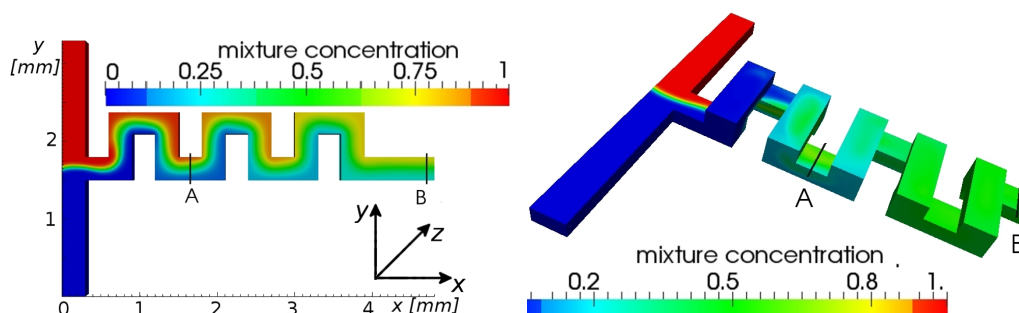


Rysunek 13: Zmiana ciśnienia wzdłuż rozważanego rurociągu,  $p(x, y = 0)$ , dla czasu  $t = (0.1, 1.6, 2.5, 15)$  s. Na kolejnych obrazkach widoczna jest poruszająca się fala uderzeniowa powstała na skutek nagłego otwarcia zaworów bezpieczeństwa znajdujących się na obu końcach rurociągu.

mikro-kanalów o dużej ilości zakrętów zmieniających kierunek przepływu o 90 stopni, rysunek 14.

W pracy pokazano, że efektywność mieszania może zostać polepszona zewnętrznym wywołaniem zaburzeń pola prędkości w mikro-mieszalniku poprzez zastosowanie odpowiednio zdefiniowanych pulsacji pola prędkości substancji wprowadzanych do mieszalnika. Najbardziej efektywne okazały się pulsacje przesunięte w fazie i o względnie wysokiej częstotliwości: 25Hz. Zastosowanie pulsacji o tak wysokiej częstotliwości wymagało rozwiązywania równań z bardzo małym krokiem czasowym.

Następnie pokazana została możliwość uproszczenia modelu numerycznego rozważanych mieszalników do geometrii dwuwymiarowych wraz z pominię-



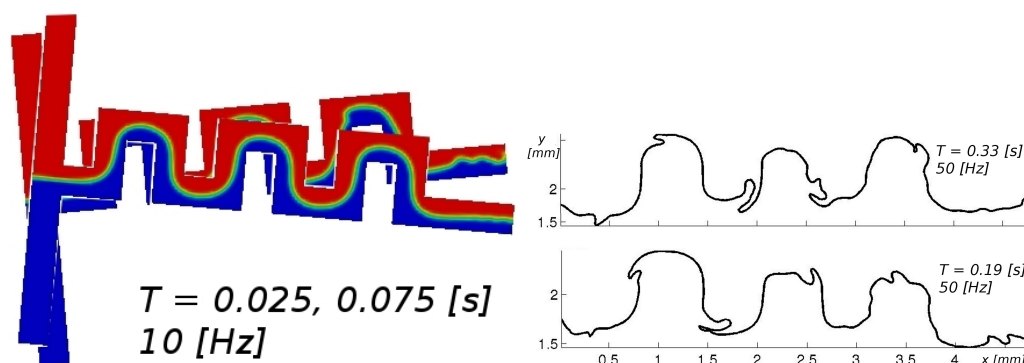
Rysunek 14: Model numeryczny badanych mikro-mieszalników. Lewy obrazek: mikro-mieszalnik o kanałach zmieniających kierunek w dwóch płaszczyznach; prawy obrazek: mikro-mieszalnik o kanałach zmieniających kierunek w trzech płaszczyznach. Kolory oznaczają koncentrację mieszaniny dla przykładowego rozwiązania, 0.5 oznacza mieszaninę idealną.

ciem samego modelu mieszania. W tym przypadku efektywność mieszania mierzona była poprzez miarę odkształceń interfejsu oddzielającego dwie substancje. Im dłuższa granica rozdzielająca dwie substancje, tym teoretycznie większy obszar kontaktu i większa możliwość wymiany masy. Algorytm śledzenia interfejsu oddzielającego dwie substancje bazował na metodzie VOF (*volume-of-fluid*).

Metoda ta najpierw była sprawdzona poprzez porównanie jej wyników z metodą (dokładną) poprzednią, a następnie została wykorzystana do zbadania możliwości zintensyfikowania mieszania poprzez wprowadzenie całego mikro-mieszalnika w wibracje o zadanym kierunku, amplitudzie i częstotliwości. Rysunek 15 przedstawia przykładowe wyniki dla mieszalnika wibrującego wokół punktu znajdującego się w jego środku oraz odkształcenia interfejsu spowodowane tym ruchem.

W cykl powyższych prac wpisuje się także praca [2] nad stworzeniem modelu numerycznego pionowego gruntowego wymiennika ciepła typu U. Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na identyfikacji odpowiedniego modelu matematycznego do symulacji transportu ciepła w pionowym gruntowym wymienniku ciepła typu U oraz wyborze odpowiedniego modelu numerycznego w oparciu o środowisko OpenFOAM.

W rozważanym wymienniku gruntowym ciepło przekazywane jest przez regiony o różnych właściwościach fizycznych oraz różnych stanach skupienia (faza ciekła, faza stała). Wymagało to użycia modelu numerycznego typu *multi-region*, w którym w poszczególnych regionach zaimplementowany jest odpowiedni model matematyczny. Wymagana była także analiza rozważanego problemu obliczeniowego pod kątem możliwych uproszczeń. W szczegól-



Rysunek 15: Lewy obrazek: mikro-mieszalnik wprawiony w vibracje kołowe, o amplitudzie 5 stopni, względem punktu leżącego w jego środku; prawy obrazek: zaburzenia interfejsu powstałe na skutek vibracji kołowych (górny obrazek) oraz vibracji wertykalnych (dolny obrazek). Powstałe zaburzenia zwiększają długość interfejsu, tym samym zwiększając pole powierzchni kontaktu rozważanych substancji.

ności założono model stacjonarny oraz niezależność wybranych parametrów fizycznych i termodynamicznych od temperatury.

Obecnie kontynuuję pracę nad zaawansowanymi problemami ciepło- przepływowymi, która, z punktu widzenia modelowania numerycznego, jest dalszym rozszerzeniem omawianych powyżej prac. Dotyczy przepływów z wymianą ciepła i przemianą fazową w płytowych wymiennikach ciepła PHE, w szczególności adaptacji ich do regazyfikacji cieczy kriogenicznych. Jest to główny cel międzynarodowego projektu, którego jestem kierownikiem (II.J1, załącznik 3).

#### 4.3.5 *Problemy ciepło- przepływowe uwzględniające zjawisko nadciekłości. Implementacja nowych modeli matematycznych.*

W pracy [4] pracowałem nad implementacją modelu matematycznego transportu ciepła w helu nadciekłym oraz w szczególności nad stworzeniem nowych warunków brzegowych uwzględniających transport ciepła przez cienkie izolacje, których właściwości termiczne były funkcją temperatury.

Praca była realizowana w kontekście stworzenia modelu numerycznego magnesów nadprzewodzących nowej generacji HeLumi. Stworzenie wspomnianych warunków brzegowych było niezbędne dla poprawnego i wiarygodnego działania modelu, gdyż obecność cienkich izolacji, o różnej funkcji i charakterystyce jest powszechna w magnesach. W szczególności dotyczy to cienkowarstwowych zabezpieczeń typu *quench heaters*, których zadaniem jest na-



tychmiastowe wyprowadzenie całego magnezu z nadprzewodności w razie jej utraty w dowolnym miejscu magnezu.

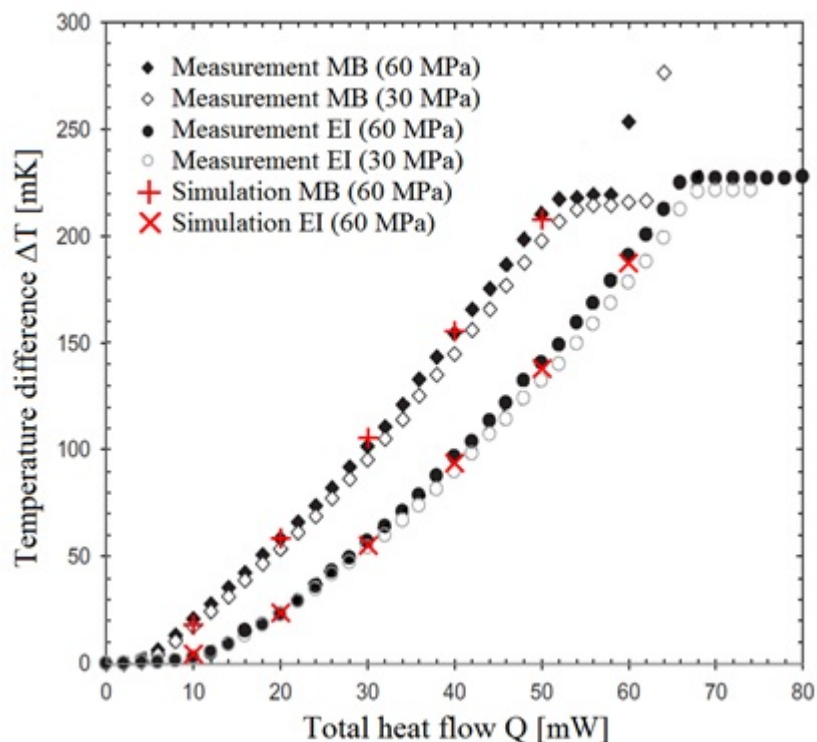
Poza zbadaniem wpływu zmiany wybranych aspektów konstrukcyjnych na termiczną pracę magnezu, wykonane zostały badania zainspirowane pracą [8]. W warunkach rzeczywistych, temperatura nadciekłego helu, dostarczanego do chłodzenia magnesów, waha się w granicach 1.9K - 2.1K. Zapostulowano, że możliwość kontrolowania tych oscylacji, może mieć wpływ na bardziej efektywne odbieranie ciepła od magnezu. W tym celu wykonałem serię badań numerycznych, w których temperatura helu chłodzącego zmieniała się według zadanego schematu oscylacji. Zostało pokazane, że w przypadku oscylacji przesuniętych w fazie o 90 stopni, możliwe było znaczne zmniejszenie wahań temperatury w samym magnesie, przez co możliwa była bardziej stabilna praca magnezu. Wydaje się to w szczególności cenne, gdyż dało to możliwość wpływu na pracę magnezu, bez jego konstrukcyjnych zmian.

Problem dotyczący termicznego modelowania cienkich izolacji w obecności helu nadciekłego był także inspiracją dla powstania pracy [15]. W magnesach nadprzewodzących, z jednej strony istnieje konieczność izolacji elektrycznej poszczególnych kabli rdzenia magnezu, z drugiej strony wymagany jest jak najbardziej efektywny odbiór ciepła od tych kabli. Oba te cele wydają się sprzeczne, dlatego pojawiła się konieczność tworzenia izolacji z odpowiednich materiałów. Z drugiej strony, eksperymenty, pokazały, że w przypadku taśm izolacyjnych nawiniętych wielowarstwowo możliwy jest lepszy odbiór ciepła, gdyż hel nadciekły, będąc płynem nielepkiem, może penetrować, przez mikrokanały powstające na styku poszczególnych warstwach taśm. Warunkiem bardziej intensywnego odbioru ciepła jest nawinięcie taśmy izolującej według odpowiedniego schematu.

W pracy [15] stworzono numeryczny warunek brzegowy pozwalający na modelowanie przepływu ciepła przez izolacje wielowarstwowe o zadanym schemacie nawijania, w obecności helu nadciekłego. Wyniki uzyskane w pracy zostały porównane z eksperymentem, gdzie przebadano dwa sposoby nawijania izolacji, rysunek 16. Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność zaproponowanego w pracy [15] modelu. Model może służyć jako narzędzie do badania oraz optymalizacji innych schematów nawijania izolacji.

#### ***4.3.6 Przepływy w geometriach rzeczywistych. Przyspieszanie obliczeń poprzez wykorzystanie możliwości procesorów kart graficznych GPU.***

W pracy [11] byłem zaangażowany w pracę, której celem było zaimplementowanie procedur do rozwiązywania rzadkich systemów równań linowych na procesorach graficznych GPU. Systemy takie są wynikiem dyskretyzacji rów-



Rysunek 16: Porównanie obliczeń numerycznych z wynikami eksperymentalnymi. Widoczna satysfakcjonująca zgodność zaproponowanego modelu numerycznego cienkich izolacji wielowarstwowych z dostępnymi danymi eksperymentalnymi dla różnych typów nawinięć izolacji. Wypląszczenie się wyników eksperymentalnych powyżej 70mW, odpowiada wyjściu helu ze stanu nadciekłości i było poza zainteresowaniem przeprowadzonych badań.

nań różniczkowych cząstkowych i stanowią podstawę większości narzędzi obliczeniowych. Zaimplementowanie ich w trybie równoległym na procesorach GPU dało możliwość znacznego przyspieszenia obliczeń także zagadnień przepływowych.

Moim zadaniem było przygotowanie modelu numerycznego przepływu w aorcie brzusznej, bazującego na geometrii rzeczywistej, odtworzonej ze zdjęć MRI (*Magnetic resonance imaging*). Aby zbadać przyspieszenie obliczeń w zależności od skomplikowania modelu matematycznego, obliczenia były wykonane w oparciu o różne modele matematyczne: przepływ potencjalny, przepływ stacjonarny oraz przepływ niestacjonarny. W przypadku przepływu niestacjonarnego dodatkowo zostały użyte zmienne w czasie, pulsacyjne warunki brzegowe symulujące pracę serca.

Wyniki testu pokazały, że szybkość obliczeń spada wraz ze skomplikowaniem

modelu, co można wytłumaczyć zwiększonym zapotrzebowaniem na przesyłanie informacji między procesorami GPU a pamięcią RAM i procesorem CPU.

## **5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych.**

### **5.1 Przebieg pracy naukowej przed osiągnięciem tytułu doktora.**

W 2003 roku uzyskałem tytuł magistra inżyniera, kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn, broniąc pracę magisterską na Wydziale Mechaniczno – Energetycznym Politechniki Wrocławskiej. Moja praca magisterska dotyczyła stworzenia narzędzi numerycznych do badania kształtu cząstki, na podstawie jej zdjęcia.

Rozpoczęcie moich zainteresowań metodami numerycznymi i komputerowymi w zastosowaniach inżynierskich i naukowych mogę umowie datować na rok 2001, kiedy to rozpocząłem studia na drugim kierunku, na Wydziale Podstawowych Problemów Technicznych (WPPT) Politechniki Wrocławskiej, w specjalności: informatyka matematyczna. Podczas trwania tych studiów zaliczyłem wiele kursów dotyczących metod obliczeniowych, co dało mi kompleksowe podstawy z metod numerycznych i matematyki inżynierskiej. Mimo dobrych ocen z licznych egzaminów, zdecydowałem się na przerwanie tych studiów w roku 2003, gdyż w tym samym roku podjąłem studia doktoranckie.

Studia doktoranckie podjąłem w roku 2003 na Wydziale Mechaniczno – Energetycznym Politechniki Wrocławskiej (WME), w Zakładzie Numerycznego Modelowania Przepływów. Mój wybór był umotywowany solidnymi podstawami w zakresie mechanik płynów i termodynamiki, uzyskanymi na wydziale WME oraz kompetencjami w zakresie metod obliczeniowych uzyskanymi na wydziale WPPT.

Moja praca doktorska była zatytułowana: „Modelowanie oddziaływań struktur wirowych ze ścianami w przepływach lepkich metodą cząstek wirowych” i w głównej mierze skupiała się nad rozwojem nowatorskiej metody obliczeniowej typu „Wir w komórce”. Pracę doktorską obroniłem dnia 17.12.2008 roku z wyróżnieniem.

Podczas trwania studiów doktoranckich opublikowałem szereg artykułów związanych z tematyką metody obliczeniowej „Wir w komórce” oraz oddziaływaniami struktur wirowych ze ścianami sztywnymi.

Odbyłem także dwa staże zagraniczne. Pierwszy na Wydziale Nauk Technicznych, Uniwersytet w Nowym Sadzie w Serbii, w ramach programu IAESTE.

Podczas pobytu na Uniwersytecie w Nowym Sadzie zajmowałem się zagadnieniem stabilności w mechanice płynów, w szczególności użyłem metody obliczeniowej typu „Wir w komórce” to modelowania niestabilności Kelvina-Helmholtza.

Mój drugi staż odbyłem w Anglii na Uniwersytecie w Leeds na *Faculty of Engineering* w ramach stypendium Socrates-Erasmus dla doktorantów w semestrze zimowym w roku akademickim 2006/07. W ramach pobytu pracowałem nad adaptacją metody obliczeniowej „Wir w komórce” do przepływów z wewnętrznymi przeszkodami (obszary niespójne), gdzie dodatkową trudnością było określenie wartości funkcji prądu na przeszkodach wewnętrznych.

W czasie trwania doktoratu uczestniczyłem w pracach związanych z grantem badawczym KBN pt.: „Oddziaływania struktur wirowych z warstwą przyścienną w przepływach dwu- i trójwymiarowych metodą cząstek wirowych”. Brałem także udział w projekcie w ramach współpracy z przemysłem, dotyczącej rozwijania oprogramowania komputerowego do symulacji pracy kotła fluidalnego.

W czasie trwania doktoratu opublikowałem łącznie 6 artykułów naukowych, z czego 5 w czasopismach z listy filadelfijskiej, o łącznym IF: 2.169 oraz punktach MNiSW: 82. Brałem także czynny udział w 5 konferencjach naukowych gdzie wygłosiłem referaty.

## **5.2 Przebieg pracy naukowej po osiągnięciu tytułu doktora.**

Bezpośrednio po zakończeniu studiów doktoranckich rozpocząłem współpracę z Instytutem Inżynierii Lotniczej i Procesowej oraz Maszyn Energetycznych Politechniki Wrocławskiej w ramach projektu: „Opracowanie metod wizualizacji przepływu cieczy i nadzór techniczny budowy stanowiska doświadczalnego do badań oddziaływania struktur wirowych ze ścianą płaską”, gdzie współpracowałem przy budowie stanowiska laboratoryjnego (patrz II.F1 - Zał. 3).

*Pobyt na Uniwersytecie Michigan w Ann Arbor, USA.*

*Okres: 01.09.2009 – 31.12.2009.*

Po zakończeniu pracy nad powyższym projektem wyjechałem na swój pierwszy podoktorski staż zagraniczny (*short-term scholar*) na Wydział Matematyczny Uniwersytetu Michigan w Ann Arbor w USA. W ramach stażu kontynuowałem pracę nad metodą „Wir w komórce” w kontekście obliczeń równoległych oraz brałem czynny udział w zajęciach dotyczących programowania równoległego oraz numerycznej algebry liniowej ze szczególnym uwzględnieniem numerycznego rozwiązywania układów równań liniowych. Zdobyte

doświadczenie pozwoliło mi między innymi na podjęcie współpracy z firmą Vratris z Wrocławia, gdzie pracowałem nad rozwinięciem algorytmów rozwiązywania równań liniowych na procesory graficzne GPU, podsumowanie tej pracy jest częściowo zawarte w publikacji [11].

Współpraca z firmą Vratris była kontynuowana latach 2013-2015, gdy byłem członkiem rady naukowej przy spółce Vratris, gdzie moja pomoc merytoryczna dotyczyła metod numerycznych oraz mechaniki płynów.

Za swoje bardzo ważne osiągnięcie podczas pobytu na Uniwersytecie Michigan uważam zdobycie doświadczenia w pracy w zespołach międzynarodowych, co znacznie pomogło mi w dalszej współpracy międzynarodowej.

*Praca na stanowisku: Asystent naukowo-dydaktyczny na Politechnice Wrocławskiej.*

Po powrocie z Uniwersytetu Michigan, na początku 2010 roku zostałem zatrudniony na stanowisku Asystenta naukowo-dydaktycznego w Instytucie Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych Politechniki Wrocławskiej. W ramach pracy brałem czynny udział jako wykonawca w projektach międzynarodowych pt.: „*European Coordination for Accelerator Research and Development, Europejska współpraca na rzecz rozwoju i badań akceleratorów*” [II.J5 – Zał. 3], gdzie pracowałem nad dwupłynowym modelem numerycznym helu nadciekłego oraz „*Simulation study of helium release into the XFEL-tunnel, Symulacja badania wycieku helu do tunelu akceleratora XFEL*” [II.J7 - Zał. 3].

W tym projekcie zajmowałem się między innymi symulacjami numerycznymi dotyczącymi nagłego wycieku kriogenicznego helu do budowanego tunelu akceleratora XFEL (*European x-ray free electron laser*) w Niemczech. Badanie te wymagały, między innymi identyfikacji odpowiedniego modelu matematycznego oraz poczynienia szeregu dopuszczalnych uproszczeń z zachowaniem kluczowej fizyki dla badanego zagadnienia [13].

*Pobyt na Uniwersytecie New Hampshire w Durham, USA.*

*Okres: 01.11.2010 – 31.01.2014.*

Pod koniec roku 2010 wyjechałem ponownie do USA na staż podoktorski na Uniwersytet New Hampshire w Durham (UNH). Od dnia 01.11.2010 do 31.01.2014 roku pracowałem w ramach interdyscyplinarnego programu *Integrated Applied Mathematics Program* na wydziale *College of Engineering & Physical Sciences* na stanowisku *Affiliated Faculty*. W ramach tej pracy przebywałem także kilkakrotnie na Uniwersytecie Colorado w Boulder (UCB) na Wydziale Matematyki Stosowanej (*Applied Mathematics Department*), gdzie

współpracowałem z profesorem Keith Julien.

W ramach mojej pracy badawczej w UNH oraz UCB pracowałem nad nowatorskimi wieloskalowymi algorytmami i metodami numerycznymi z wykorzystaniem metod perturbacyjnych i asymptotycznych. Pozwoliło mi to znacząco rozszerzyć moje umiejętności w zakresie modelowania numerycznego transportu masy i ciepła o zastosowanie nowych technik prowadzących do systematycznych uproszczeń problemu wyjściowego, oraz w nabraniu nieocenionej intuicji w pracy nad złożonymi systemami transportu ciepła i masy. Mój drugi pobyt w USA zaowocował artykułami opublikowanymi w renomowanych czasopiśmie [7, 9] oraz wygłoszeniem wielu referatów konferencyjnych [II.L3,II.L5-II.L10 - Zał. 3].

W trakcie mojego pobytu na UNH kontynuowałem współpracę z Politechniką Wrocławską w ramach pracy nad identyfikacją wystarczającego (minimalnego) modelu matematycznego do symulowania nagłego wyrzutu gazów kriogenicznych do ciepłego otoczenia, dającego możliwość przewidzenia szybkości propagacji mieszaniny hel-powietrze oraz charakteru przepływu ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska stratyfikacji. Praca ta została podsumowana w publikacji [10].

Uniwersalność stosowanych metod i narzędzi numerycznych dały mi także w tym czasie możliwość współpracy z Zakładem Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej, gdzie stworzyłem model numeryczny mikromieszalnika i przeprowadziłem serię obliczeń numerycznych obrazujących możliwość intensyfikacji mieszania, w oparciu o oprogramowanie OpenFOAM. Praca ta wymagała identyfikacji odpowiedniego modelu matematycznego, odpowiedniego do symulacji przepływów w mikro-kanałach oraz uwzględniających mieszanie się dwóch substancji o zadanych właściwościach fizycznych oraz zastosowania niestacjonarnych warunków brzegowych i ruchomej geometrii. Praca ta została podsumowana w publikacji [8].

*Praca na stanowisku: Adiunkt naukowo-dydaktyczny na Politechnice Wrocławskiej.*

Do Polski powróciłem ponownie na początku 2014 i rozpocząłem pracę na stanowisku Adiunkta naukowo-dydaktycznego w Instytucie Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych Politechniki Wrocławskiej (obecnie Katedra Inżynierii Kriogenicznej, Lotniczej i Procesowej), gdzie pracuję do dnia dzisiejszego.

W tym czasie brałem czynny udział w wielu projektach międzynarodowych [II.J2-II.J4, II.J6 - Zał. 3] oraz odbyłem dwie miesięczne wizyty w CERN jako *Cooperation Associates*. W ramach prac w projektach oraz prac statutowych dalej rozwijałem prace nad złożonymi i niestandardowymi problemami

dotyczącymi transportu ciepła i masy, w szczególności obliczeń wspomagających analizy bezpieczeństwa i projektowanie sieci kriogenicznych.

W ramach projektu „*Cold-helium release experiment in the LHC underground tunnel*” [patrz, II.J3 - Zał. 3] opracowałem model numeryczny tunelu LHC w CERN na potrzeby symulacji awaryjnego wypływu kriogenicznego helu. Przy pomocy tego modelu możliwe było precyzyjne określenie zawartości tlenu w tunelu, prędkości propagacji chmury helowo-powietrznej oraz określenie reżimu przepływu ze względu na wystąpienie rodzaju stratyfikacji (lub jej braku).

W ramach projektu „*Design of a pan-European Infrastructure for Large Apparatus studying Grand Unification, Neutrino Astrophysics and Long Baseline Neutrino Oscillations*” [patrz, II.J4 - Zał. 3] opracowałem model numeryczny tunelu kopalni Pyhasalmi w Finlandii, w której ma być umieszczony przyszły detektor neutrin. Model pozwolił na symulację awaryjnego wypływu kriogenicznego argonu na skutek pęknięcia cysterny przewożącej ciekły argon. Przy pomocy tego modelu możliwe było określenie zawartości tlenu w tunelu, prędkości i kierunku propagacji mieszaniny w zależności od intensywności wentylacji tunelu kopalni. Pozwoliło to na zdefiniowanie trzech krytycznych wartości prędkości powietrza wentylacyjnego, dla których chmura argonowa zaczynała poruszać się w górę lub w dół kopalni, lub utrzymywać się w pobliżu miejsca zdarzenia.

W ramach projektu „*Zaprojektowanie CDS dla akceleratora liniowego oraz stanowiska 2 Lund Test (European Spallation Source)*” [patrz, II.J2 - Zał. 3] opracowałem model numeryczny do oszacowania minimalnego pola przekroju zaworu bezpieczeństwa dla długich kriogenicznych instalacji rurowych. W tym przypadku, nagły wzrost ciśnienia był związany z intensywnym strumieniem ciepła na skutek awarii izolacji.

Poprawne oszacowanie wielkość zaworu było konieczne dla zapewnienia bezpiecznej pracy instalacji oraz miało aspekt ekonomiczny, gdyż przeszacowanie wielkości zaworu może także prowadzić do przeszacowania średnicy samego rurociągu.

Badania prowadzone w powyższych projektach pozwoliły mi na napisanie szeregu publikacji naukowych [1, 3, 6, 14], w których część związana z modelowaniem numerycznym odgrywała zasadniczą rolę.

Kolejnym zagadnieniem, które wymagało ode mnie poszerzenia wiedzy o kolejne aspekty związane z transportem ciepła w kontekście niestandardowych modeli matematycznych i numerycznych była praca nad stworzeniem modelu matematycznego magnesu nadprzewodzącego nowej generacji (projekt HiLumi, CERN). Wymagało to zaimplementowania modelu matematycznego transportu ciepła w helu nadciekłym oraz stworzenia warunków brzegowych modelujących przepływ ciepła przez cienkie izolacje, których właściwości

zmieniają się wraz z temperaturą, praca [4].

Doświadczenie zdobyte podczas tych badań pozwoliło mi na rozwinięcie użytej tam metody do modelowania przepływu ciepła przez wielowarstwowe cienkie izolacje o zadanej strukturze nawijania w obecności cieczy nadciekłej, praca [15]. Jest szczególnie ważne w przypadku izolowania kabli nadprzewodnikowych rdzeni dużych magnesów nadprzewodzących.

Obecnie pracuję między innymi nad modelami numerycznymi różnego typu wymienników ciepła, zarówno na potrzeby geotermalne, praca [2], jak i pracujących w warunkach kriogenicznych. Obecnie jestem kierownikiem międzynarodowego projektu w ramach współpracy Polska-Tajwan, pt.: „*Development of plate heat exchangers for liquid inert gas vaporization, and the modelling of the two-phase flow in heat exchangers, Badania płytowych wymienników ciepła do regazyfikacji cieczy kriogenicznych i modelowanie dwufazowych przepływów w wymiennikach*” [II.J1 - Zał. 3], gdzie rozwijany jest model numeryczny płytowego wymiennika ciepła na potrzeby regazyfikacji cieczy kriogenicznych oraz uwzględniającego przemianę fazową. Model numeryczny będzie wykorzystany do przeprowadzenia serii eksperymentów numerycznych oraz w procesie projektowania płytowych wymienników ciepła.

### 5.3 Szczególne osiągnięcia dydaktyczne i popularyzatorskie.

Zebrane dotychczas doświadczenie pomogło mi także w opracowaniu i uruchomieniu autorskiego wykładu w ramach studiów doktoranckich na Politechnice Wrocławskiej pt.: „*Introduction to numerical modeling using the open source software: OpenFOAM*”. Wykład cieszy się dużą popularnością i jest adresowany do doktorantów ze wszystkich wydziałów Politechniki Wrocławskiej, zainteresowanych modelowaniem numerycznym z wykorzystaniem darmowego, profesjonalnego oprogramowania OpenFOAM. Oprogramowanie to doskonale nadaje się do implementacji niestandardowych modeli matematycznych dotyczących między innymi transportu ciepła i masy. Wykład prowadzony jest w języku angielskim, co daje możliwość uczestnictwa studentom zagranicznym.

W mojej pracy dydaktycznej zdecydowałem się zaangażować w popularyzację nauki. Dotychczas opublikowałem dwie prace w czasopiśmie *Wszechświat* (punktacja MNiSW:02), redagowanym przez Polskie Towarzystwo Przyrodników im. Kopernika. W artykule „*Zgadywanie czy przewidywanie pogody? Superkomputery kontra wieloskalowy charakter natury*” podsumowałem i wyjaśniłem ideę modelowania wieloskalowego w oparciu o moje prace badawcze prowadzone w USA, natomiast artykuł: „*Nadciekły hel, substancja magiczna*” wprowadza zagadnienie nadciekłości.

Trzeci artykuł „*USA oczami postdoca*” opublikowany w *Postępy Fizyki*, jest



pierwszym z planowanego cyklu artykułów opisujących pobyt i pracę na uczelniach w USA.

#### 5.4 Inna współpraca naukowa

W roku 2016 współpracowałem z firmą Technology Transfer Agency Techtra z Wrocławia, gdzie pracowałem nad stworzeniem modelu numerycznego detektora mionów typu GEM. Na podstawie modelu określony został przekrój czynny detektora, oraz przeprowadzony szereg jego optymalizacji. Publikacja podsumowująca powyższą pracę jest w trakcie realizacji.

W latach 2009-2010 brałem udział w realizacji projektu *SpeedIT* w ramach współpracy z firmą Vratiss (<http://speedit.vratiss.com/>). Celem projektu było stworzenie bibliotek numerycznych, do rozwiązywania liniowych równań algebraicznych, dedykowanych na procesory GPU oraz współpracujących z oprogramowaniem OpenFOAM.

## 6 Podsumowanie

Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR) oraz punktacja MNiSW, zgodnie z rokiem opublikowania:

1. Prace opublikowane po doktoracie:  $IF = 11.227$ ,  $MNiSW = 251$
2. Wszystkie opublikowane prace:  $IF = 13.396$ ,  $MSiSW = 333$

Liczba cytowań publikacji według bazy:

1. Web of Science (WoS): 15 (z autocytowaniami: 23)
2. ResearchGate: 52
3. Google Scholar: 66
4. Mendeley/Scopus: 30

Indeks Hirscha według bazy (**bez autocytowań**):

1. Web of Science (WoS): 3
2. ResearchGate: 4
3. Google Scholar: 5
4. Mendeley/Scopus: 4

Zbigniew Mielec