

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko

Paweł Jerzy MATUSZYK

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe — z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

2005 **doktor nauk technicznych**, specjalność: informatyka
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Tytuł rozprawy: *Obiektowa realizacja równoległych algorytmów dla wybranych procesów przeróbki plastycznej w środowisku klastra z dzieloną pamięcią.*

2000 **magister inżynier**, specjalność: informatyka
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Tytuł rozprawy: *Zastosowanie metody elementów skończonych do rozwiązania stacjonarnego równania przepływu ciepła w 2D.*

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

od 2013 **Research, Development & Design Scientist**
Baker Hughes Incorporated, USA
Houston Technology Center.

2010 – 2013 **Research Associate**
The University of Texas at Austin, USA
Department of Petroleum and Geosystems Engineering.

2008 – 2010 **Postdoc**
The University of Texas at Austin, USA
Department of Petroleum and Geosystems Engineering.

2006 – 2013 **Adiunkt**
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania.

- 2007 – 2008 **Wykładowca**
Wyższa Szkoła Handlowa w Radomiu
Wydział Informatyki.
- 2000 – 2006 **Asystent**
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Katedra Informatyki Stosowanej i Modelowania.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

Moje osiągnięcie naukowe w zacytowanym powyżej rozumieniu stanowi cykl publikacji, którego tematyka obejmuje

Zastosowanie metody elementów skończonych z automatyczną adaptacją typu *hp* do modelowania profilowania akustycznego w odwiertach.

4.1. Prace stanowiące jednotematyczny cykl publikacji

- J1: David Pardo, Paweł J **Matuszyk**, Ignacio Muga, Carlos Torres-Verdín, Angel Mora, and Victor M. Calo. Simulation of wireline sonic logging measurements acquired with borehole-eccentered tools using a high-order adaptive finite-element method. *J Comput Phys*, 230(16):6320 – 6333, 2011. [**IF 2.310**, 45 pkt. MNiSW, mój udział **40%**]
- J2: Paweł J **Matuszyk**, L. Demkowicz, and C. Torres-Verdín. Solution of coupled acoustic-elastic wave propagation problems with anelastic attenuation using automatic *hp*-adaptivity. *Comput Method Appl M*, 213-216:299–313, 2012. [**IF 2.617**, 40 pkt. MNiSW, mój udział **80%**]
- J3: Paweł J **Matuszyk** and Leszek Demkowicz. Parametric finite elements, exact sequences and perfectly matched layers. *Comput Mech*, 51(1):35–45, 2013. [**IF 2.044**, 40 pkt. MNiSW, mój udział **80%**]
- J4: David Pardo, Paweł J **Matuszyk**, Ignacio Muga, Carlos Torres-Verdín, Angel Mora, and Victor M. Calo. Influence of borehole-eccentered tools in wireline and logging-while-drilling sonic logging measurements. *Geophys Prospect*, 61(Suppl. 1):268–283, 2013. [**IF 1.506**, 25 pkt. MNiSW, mój udział **40%**]
- J5: Paweł J **Matuszyk**, Carlos Torres-Verdín, and David Pardo. Frequency-domain finite-element simulations of 2D sonic wireline borehole measurements acquired in fractured and thinly bedded formations. *Geophysics*, 78(4):D193–D207, 2013. [**IF 1.759**, 25 pkt. MNiSW, mój udział **70%**]

- J6: Paweł J **Matuszyk** and Carlos Torres-Verdín. Back-propagating modes in elastic logging-while-drilling collars and their effect on PML stability. *Comput Math Appl*, 66(11):2335–2343, Nov 2013. [**IF 1.996**, 35 pkt. MNiSW, mój udział **90%**]
- J7: Paweł J **Matuszyk** and Carlos Torres-Verdín. Frequency-domain simulation of Logging-While-Drilling borehole sonic waveforms. *Geophysics*, 79(2):D99–D113, Mar 2014. [**IF 1.759**, 25 pkt. MNiSW, mój udział **90%**]
- J8: Paweł J. **Matuszyk** and Leszek F. Demkowicz. Solution of coupled poroelastic/acoustic/elastic wave propagation problems using automatic *hp*-adaptivity. *Comput Method Appl M*, 281:54–80, Nov 2014. [**IF 2.626**, 45 pkt. MNiSW, mój udział **90%**]

4.2. Publikacje powiązane tematycznie, lecz nie wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

- E1: Maciej Paszyński, David Pardo, Carlos Torres-Verdín, and Paweł J **Matuszyk**. Efficient sequential and parallel solvers for *hp* finite element method. In *APCOM'07–EPMESC XI: third Asian-Pacific Congress on Computational Mechanics in conjunction with eleventh international conference on Enhancement and Promotion of Computational Methods in Engineering and Science*, page 185, 2007
- E2: David Pardo, Paweł J **Matuszyk**, and Mjung Jin Nam. A *hp* Fourier-finite-element framework with multiphysics applications. In Ph. Bouillard and P. Diez, editors, *ADMOS 2009: Int. Conf. on Adaptive Modeling and Simulation*, 2009
- E3: Paweł J **Matuszyk**, Leszek Demkowicz, David Pardo, Jun Ma, and Carlos Torres-Verdín. 2D finite element simulation of sonic measurements acquired in the presence of a tool mandrel. In *Extended Abstract for the 9th Annual Meeting, Joint Industry Research Consortium on Formation Evaluation, The University of Texas at Austin, TX, USA, Aug 2009*, 2009
- E4: David Pardo, Paweł J **Matuszyk**, Angel Mora, Victor M. Calo, and Carlos Torres-Verdín. Simulation of acoustic logging measurements with borehole-eccentered tools using a Fourier *hp*-finite-element method. In *Extended Abstract for the 10th Annual Meeting, Joint Industry Research Consortium on Formation Evaluation, The University of Texas at Austin, TX, USA, Aug 2010*
- E5: Paweł J **Matuszyk**, Carlos Torres-Verdín, and Leszek F. Demkowicz. *hp*-Adaptive multiphysics finite element simulation of LWD borehole sonic waveforms. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, volume 29, pages 3018–3022. SEG, SEG, 2010
- E6: Paweł J **Matuszyk**, Leszek Demkowicz, and Carlos Torres-Verdín. Frequency domain automatic *hp*-adaptive FEM for simulation of coupled acoustic/elastic/poroelastic wave propagation in boreholes. In *USNCCM XI: 11th US National Congress on Computational Mechanics*, pages 235–236, 2011

- E7: Paweł J **Matuszyk**, Carlos Torres-Verdín, and Leszek Demkowicz. Sensitivity study for the assessment of hydrofractures with borehole acoustic waveforms. In *Extended Abstract for the 11th Annual Meeting, Joint Industry Research Consortium on Formation Evaluation, The University of Texas at Austin, TX, USA*, Aug 2011
- E8: Paweł J **Matuszyk** and Carlos Torres-Verdín. *hp*-Adaptive multi-physics finite-element simulation of wireline borehole sonic waveforms. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, volume 30 of *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pages 444–448. SEG, SEG, 2011
- E9: Paweł J **Matuszyk** and Carlos Torres-Verdín. Comparative study of shear-wave velocities estimated from LWD quadrupole and wireline dipole measurements. In *Extended Abstract for the 12th Annual Meeting, Joint Industry Research Consortium on Formation Evaluation, The University of Texas at Austin, TX, USA*, Aug 2012
- E10: Shan Huang, Paweł J **Matuszyk**, and Carlos Torres-Verdín. Spatial sensitivity function for the rapid simulation and interpretation of sonic logs. In *Extended Abstract for the 12th Annual Meeting, Joint Industry Research Consortium on Formation Evaluation, The University of Texas at Austin, TX, USA*, Aug 2012
- E11: Shan Huang, Paweł J **Matuszyk**, and Carlos Torres-Verdín. Spatial sensitivity functions for rapid and accurate simulation of borehole sonic measurements. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, volume 32 of *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. SEG, SEG, Sep 2013
- E12: Shan Huang, Qinshan Yang, Paweł J **Matuszyk**, and Carlos Torres-Verdín. High-resolution interpretation of sonic logging measurements using stochastic inversion with spatial slowness sensitivity functions. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, volume 32 of *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. SEG, SEG, Sep 2013
- E13: Paweł J **Matuszyk** and Carlos Torres-Verdín. Numerical simulation and interpretation of behind-casing acoustic sonic measurements in the presence of open fractures. In *Extended Abstract for the 13th Annual Meeting, Joint Industry Research Consortium on Formation Evaluation, The University of Texas at Austin, TX, USA*, Aug 2013

4.3. Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Wprowadzenie

Profilowanie akustyczne w odwiertach jest jedną z podstawowych metod badania formacji skalnej otaczającej otwór wiertniczy i jedną, która pozwala na wyznaczenie jej własności mechanicznych. Metoda ta polega na wzbudzaniu przez sondę fali akustycznej w płucce (płynie wypełniającym odwiert) o znanej charakterystyce czasowej i częstotliwościowej. Fala ta rozchodzi się wewnątrz odwiertu, wzdłuż jego ścian oraz częściowo penetruje formację skalną generując jednocześnie dodatkowe mody falowe (np. fale poprzeczne i fale prowadzone). Sygnał akustyczny jest następnie rejestrowany przez zespół odbiorników (*array sonic tool*)

zamontowanych na sondzie w pewnej odległości od nadajnika (zazwyczaj od 1 do 5.5 m). Pomiar odbywa się podczas ruchu sondy wzdłuż odwiertu i pozwala dzięki temu na pełne profilowanie otworu. Na podstawie tak uzyskanych obrazów falowych można oszacować, stosując różnorodne algorytmy obróbki sygnałów, liczbę i charakterystykę (rodzaj, częstotliwość odcięcia, kierunek i prędkość propagacji oraz tłumienie) wzbudzonych modów falowych.

Rodzaj, liczba i charakter wzbudzonych fal zależy od wielu czynników, do których należą: geometria odwiertu i otaczającej go formacji skalnej (warstwowanie, szczeliny, uskoki, porowatość), własności mechaniczne skał i nasycających je płynów oraz charakterystyka częstotliwościowa źródła akustycznego. Istotne znaczenie ma także obecność oraz mechaniczne własności samej sondy używanej do profilowania akustycznego — z reguły jej obecności nie można w prosty sposób wyeliminować i konieczne jest jej odpowiednie uwzględnienie w procesie modelowania. Odpowiednia interpretacja obrazów falowych uzyskanych w wyniku profilowania akustycznego pozwala na wyznaczenie własności mechanicznych skał otaczających odwiert takich jak: dynamiczne moduły sprężystości, współczynnik Poissona, współczynniki tłumienia, anizotropia, przepuszczalność, porowatość, litologia, obecność pęknięć i szczelin oraz nasyce nie skał węglowodorami. Różnorodność i całkowicie odmienne charakterystyki wzbudzonych jednocześnie fal oraz fakt, iż większość szacowanych parametrów formacji skalnej nie jest mierzona bezpośrednio sprawiają, że proces interpretacji profilowania akustycznego jest skomplikowany i wymaga wyrafinowanych algorytmów obróbki surowych danych zarejestrowanych przez sondę akustyczną.

Profilowanie akustyczne może być wykonywane zarówno w trakcie wiercenia (tzw. *logging-while-drilling*, LWD), w celu wyznaczenia optymalnej trajektorii odwiertu oraz parametrów dynamicznych niezmięnionej formacji *in situ* przy minimalnych efektach inwazji płuczki, jak również po jego wykonaniu (bądź wykończeniu, czyli zarurowaniu), by oszacować istotne dla wydobywania kopalin płynnych parametry mechaniczne formacji (tzw. *wireline logging*, WL).

Dla najczęściej stosowanych częstotliwości sygnału (1-40 kHz), profilowanie akustyczne w odwiertach pozwala na uzyskanie zasięgu do kilkudziesięciu centymetrów w głąb formacji (do około 25 metrów dla technologii *Deep Shear Wave Imaging*, *DSWI*¹) oraz rozdzielczości pionowej rzędu centymetrów. Tak więc, omawiana metoda lokuje się pomiędzy profilowaniem sejsmicznym a obrazowaniem ultradźwiękowym.

W zależności od rodzaju źródła fali akustycznej, można wzbudzić w odwiercie różne rodzaje fal. Użycie źródła monopolowego prowadzi do wzbudzenia fal objętościowych (*body waves*) oraz fal prowadzonych (*guided waves*). Do tych pierwszych można zaliczyć fale podłużne (P) i poprzeczne (S), właściwe dla ośrodków sprężystych, propagujące się na ścianie odwiertu w postaci fal czołowych (*head waves*); do drugich — fale Stoneleya, pseudo-Rayleigha, i tzw. *leaky modes*. Fale prowadzone powstają w wyniku konstruktywnej interferencji fali powierzchniowej (rozchodzącej się wzdłuż ściany otworu) z całkowicie odbitymi falami wewnątrz falowodu, jakim jest odwiert; ich istnienie powiązane jest z istnieniem rezonansów w jego wnętrzu. Ze względu na fakt, iż energia fal prowadzonych jest niejako „uwieczniona” wewnątrz falowodu (stąd ich nazwa) i jest tylko w niewielkim stopniu rozpraszana na zewnątrz, ich obrazy falowe cechują się relatywnie wysokimi amplitudami.

¹Tang, X.-M. and Patterson, D.: Single-well S-wave imaging using multicomponent dipole acoustic-log data. *Geophysics* 74(6) WCA211-WCA223, 2009.

Równocześnie, fale te cechuje zazwyczaj dość duża dyspersja, przez co są one znacznie trudniejsze w identyfikacji i interpretacji niż fale czołowe.

W formacjach skalnych, dla których nie można wygenerować fali czołowej poprzecznej (S)² używa się źródeł dipolowych (WL) lub kwadrupolowych (LWD) (nazwy pochodzą od rodzaju azymutalnej charakterystyki promieniowania źródła w płaszczyźnie transwersalnej). Generują one w formacji, odpowiednio, fale nazywane jako *flexural* i *screw waves*. Oba rodzaje fal propagują się w niskich częstotliwościach z prędkością bliską prędkości fali poprzecznej w skale otaczającej otwór oraz przejawiają dość silną dyspersję. Fale *flexural* posiadają dodatkowo charakterystykę kierunkową, co pozwala na ich użycie do wyznaczania anizotropii oraz stanu naprężeń formacji skalnej w pobliżu ścian odwiertu, a także do obrazowania struktur geologicznych (np. szczelin i uskoków) w pewnej odległości od odwiertu (DSWI). Pozwala to na lepszą identyfikację ułożenia warstw skalnych, ocenę stabilności otworu wiertniczego, a także na zaplanowanie najbardziej efektywnego sposobu szczelinowania hydraulicznego w celu zwiększenia wydajności (lub czasem w ogóle umożliwienia) eksploatacji złoża.

Kluczową kwestią dla poprawnej interpretacji uzyskanych w trakcie profilowania akustycznego obrazów falowych jest możliwość numerycznego modelowania tego procesu z uwzględnieniem wszystkich jego istotnych aspektów. Jest to konieczne dla lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w czasie profilowania akustycznego oraz badania wpływu różnych czynników na charakterystykę fal wzbudzanych w odwiercie przez sondę. Ponadto, modelowanie takie umożliwi konstrukcję lepszych, dokładniejszych i bardziej precyzyjnych urządzeń pomiarowych, co ma bezpośredni wpływ na jakość pozyskanych informacji o otaczającej odwiert formacji skalnej.

Problemy napotymane przy modelowaniu profilowania akustycznego

Z matematycznego punktu widzenia, problem propagacji fal akustycznych w odwiercie jest problemem sprzężonym z wieloma polami fizycznymi. Należy bowiem, równocześnie rozwiązać problem propagacji fal w ośrodkach: akustycznym (czyli cieczy), (lepkosprężystym oraz porosprężystym (dwa ostatnie mogą dopuszczać pewną anizotropię), uwzględniając w modelu wzajemne interakcje pomiędzy tymi ośrodkami; propagacja fal akustycznych w każdym ośrodku opisywana jest przez odmienne układy równań różniczkowych cząstkowych.

Trudności w modelowaniu takiego problemu wynikają ze skomplikowanej geometrii samego odwiertu i otaczającej go formacji, obecności sondy (co znacząco komplikuje samo rozwiązanie oraz, później, interpretację pomiarów), dużych kontrastów materiałowych (a przez to istnienia w rozwiązaniu osobliwości) i koegzystencji różnych skal czasowych i przestrzennych w samym rozwiązaniu. Należy również zapewnić dużą dokładność rozwiązania przy występowaniu znacznego tłumienia oraz zminimalizować efekt numerycznej dyspersji. Dodatkowo, konieczne jest ograniczenie obszaru symulacji numerycznej do skończonego obszaru (problem propagacji fal jest postawiony w obszarze otwartym). Każdy z tych czynników z osobna stanowi sam w sobie nietrywialny problem — proponowany model musi uwzględnić je wszystkie. Powyższe uwarunkowania ograniczają wybór odpowiedniej metody numerycznej, która zapewniłaby

²Są to tzw. formacje wolne, w których prędkość propagacji fal poprzecznych jest mniejsza od prędkości fali podłużnej w płucce; skutkiem tego, nie istnieje kąt padania fali na ścianę odwiertu, który pozwoliłby na całkowite wewnętrzne odbicie fali S.

jednocześnie dużą dokładność oraz dużą szybkość obliczeń.

Kluczowym zagadnieniem w modelowaniu propagacji fal jest dobór i implementacja efektywnych absorpcyjnych warunków brzegowych. Ponieważ mamy do czynienia z problemem sprzężonym, musimy odrzucić dużą klasę metod, które zakładają jednorodność ośrodka znajdującego się na zewnątrz obszaru obliczeniowego (np. metodę elementów brzegowych). Obecnie, praktycznie jedyną techniką, którą można stosować dla problemów sprzężonych i która jednocześnie pozwala na otrzymywanie wysokiej jakości rozwiązań jest metoda warstwy idealnie tłumiącej (Perfectly Matched Layer, PML)³. Z tego powodu, w większości prac poświęconych modelowaniu profilowania akustycznego jest ona używana jako warstwa absorbująca.

Dokładne modelowanie geometrii, obecność dużych kontrastów stałych materiałowych oraz konieczność adaptacji (osobliwości w rozwiązaniu, duże gradienty rozwiązania w warstwie PML, kontrola dyspersji) wskazują, że preferowaną metodą jest metoda elementów skończonych wzbogacona o możliwość adaptacji siatki.

Adaptacja typu p , polegająca na modyfikacji stopnia interpolacji wielomianowej na elemencie skończonym, jest szczególnie pożądana dla problemów propagacji fal, ponieważ pozwala na znaczne zredukowanie błędów dyspersji. Powszechnie wiadomo, że w metodach niskiego rzędu (np. konwencjonalna metoda różnic skończonych) trudno jest kontrolować błędy dyspersji, a otrzymane rozwiązanie, ze względu na zbyt rzadką siatkę, może nie uwzględniać silnie zlokalizowanych fal powierzchniowych rozchodzących się na interfejsach łączących materiały o dużych kontrastach. W tym przypadku, jedynym rozwiązaniem jest użycie dużo gęstszej siatki, co szybko czyni taką metodę niepraktyczną ze względu na bardzo duże wymagania obliczeniowe. Teoretyczne i numeryczne wyniki dostępne w literaturze wskazują, że metody wyższego rzędu pozwalają na przewyciężenie tych trudności, ponieważ umożliwiają znaczącą redukcję liczby elementów siatki (i stopni swobody) w obszarach, gdzie rozwiązanie jest gładkie⁴. W konsekwencji, rozwiązanie może być dużo dokładniej aproksymowane, a rozmiar problemu dyskretnego jest znacząco ograniczony. Ponadto, metoda taka szybciej wchodzi w zakres asymptotycznej zbieżności.

Osiowa symetria otworu wiertniczego przy założeniu, że otaczające go warstwy skalne są ułożone do niego prostopadle, nasuwa możliwość redukcji modelu do problemu dwuwymiarowego. Oznacza to znaczną redukcję wymagań pamięciowych i obliczeniowych dla numerycznej symulacji całego procesu. Jak pokażę później, rozwiązując problem wciąż w dwóch wymiarach można rozszerzyć klasę modelowanych zagadnień o problemy z niesymetrycznym źródłem akustycznym (np. dipolowym lub kwadrupolowym) oraz niesymetrycznie umieszczoną sondą.

Kolejne korzyści związane są z modelowaniem profilowania akustycznego w dziedzinie częstotliwości. Podejście takie implikuje między innymi: łatwiejszą implementację warstwy idealnie tłumiącej oraz naturalną dekompozycję problemu propagacji fal na zbiór niezależnych podproblemów (odpowiadających dyskretnym częstotliwościom), które mogą być rozwiązane równolegle. W przypadku, kiedy głównym celem symulacji jest obliczenie charakterystyki

³Bérenger, J.P.: A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic-waves. *J Comput Phys* 114(2):185–200, 1994.

⁴Ihlenburg, F.: Finite element analysis of acoustic scattering, in Mardsen and Sirovich eds., Applied Mathematical Sciences, Springer, 1998.

dyspersyjnej propagujących modów falowych, rozwiązanie problemu w dziedzinie częstotliwości dostarcza wyniki, które mogą być bezpośrednio przetworzone tak, aby otrzymać krzywe dyspersji. Co więcej, ze względu na ich gładkość, wystarczy rozwiązać problem dla niewielu dyskretnych częstotliwości. Dzięki temu, w tym przypadku, można dramatycznie ograniczyć czas obliczeń w porównaniu z metodą rozwiązującą ten sam problem w dziedzinie czasu.

Omówione pokrótce przesłanki sprawiły, że zdecydowałem się na modelowanie profilowania akustycznego w odwiertach dwuwymiarową metodą elementów skończonych (MES) z adaptacją siatki typu hp w dziedzinie częstotliwości.

hp -adaptacyjna Metoda Elementów Skończonych

Metoda Elementów Skończonych (MES) jest obecnie standardową i najbardziej rozpowszechnioną metodą modelowania stosowaną w mechanice. Cechuje ją duża uniwersalność, elastyczność oraz względnie duża łatwość budowy programów komputerowych umożliwiających rozwiązywanie numeryczne szerokiego spektrum zagadnień. Zastosowanie MES znacznie upraszcza modelowanie skomplikowanych geometrii, a modelowanie nieciągłości parametrów materiałowych jest wbudowane w samą metodę pod warunkiem, że nieciągłości pokrywają się z interfejsami elementów siatki (w tym przypadku obecność takich nieciągłości nie powoduje obniżenia rzędu zbieżności metody).

Nietrywialnym rozszerzeniem MES jest jej wzbogacenie o możliwość adaptacji typu hp , a więc takiej, gdzie można zarówno zmieniać rozmiar elementów i topologię siatki obliczeniowej (adaptacja typu h), jak również modyfikować stopień interpolacji wielomianowej na każdym elemencie skończonym (adaptacja typu p). Pozwala to efektywnie modelować nowe klasy problemów. Teoretyczne prace Babuški i jego zespołu pokazały, że tylko łączona adaptacja typu h i p pozwala osiągnąć tzw. eksponencjalną zbieżność dla problemów posiadających osobliwości^{5,6}. Oznacza to, że błąd rozwiązania maleje eksponencjalnie w funkcji liczby stopni swobody użytych do rozwiązania problemu dyskretnego, w przeciwieństwie do większości innych technik, których zbieżność jest tylko algebraiczna. Własność tę potwierdzają liczne symulacje numeryczne opisane w publikacjach twórców tej metody, jak również samego autora (np. [S1] dla problemu Stokesa, [J2, J8] dla sprzężonych problemów akustyki).

Kluczową kwestią jest możliwość dokonywania adaptacji siatki w sposób całkowicie automatyczny, bez znajomości *a priori* cech szukanego rozwiązania. Strategię taką zaproponowali po raz pierwszy Rachowicz i in.⁷ W metodzie tej, wybór sposobu adaptacji siatki jest oparty o lokalną maksymalizację redukcji błędu interpolacji rozwiązania na jeden dodany stopień swobody. Proces ten, w każdym kroku adaptacji, wymaga dokonania szeregu próbnych adaptacji typu h i p aktualnej siatki i obliczenia dla nich błędów wyznaczonych w oparciu o metodę postprocessingu.

Rozwinięcie tej metody dla zastosowań praktycznych zaproponował Demkowicz⁸.

⁵Gui, W. and Babuška, I.: The h , p , and hp versions of the finite element method in one dimension. Parts 1–3. *Numer Math* 49:577-683, 1986.

⁶Guo, G. and Babuška, I.: The hp version of the finite element method. *Comput Mech* 1:21-41, 1986.

⁷Rachowicz, W., Demkowicz, L. and Oden, J.T.: Toward a universal hp -adaptive finite element strategy. Part 3: Design of hp meshes. *Comput Method Appl M* 77:181-212, 1989.

⁸Demkowicz, L.: Computing with hp Finite Elements. I. One- and Two-Dimensional Elliptic and Maxwell Problems. CRC Press, Taylor and Francis, 2006

Ulepszona metoda działa w oparciu o paradygmat dwóch siatek: roboczej i ulepszonej. Rozwiązanie obliczone na tej drugiej jest używane do szacowania błędów interpolacji na siatce roboczej. Proces adaptacji rozbity jest na kroki obejmujące kolejno redukcję błędów względnych dla krawędzi, ścian i wewnątrz elementów. Takie rozbitcie jest możliwe dzięki zastosowaniu hierarchicznych funkcji kształtu, elementów o zmiennym stopniu interpolacji wielomianowej oraz teorii interpolacji opartej o lokalne projekcje (*projection-based interpolation*)⁹ dla pewnych przestrzeni energetycznych Sobolewa tworzących ciąg dokładny (*exact sequence*)¹⁰ oraz aproksymujących je przestrzeni dyskretnych. Kluczowe znaczenie dla poprawnego działania tej metody ma komutowanie operatorów interpolacji na diagramie de Rhama na poziomie dyskretnym i ciągłym¹⁰. Opracowany przez zespół prof. Demkowicza program komputerowy dla problemów dwu- i trójwymiarowych został pomyślnie użyty do rozwiązania szeregu trudnych problemów obliczeniowych¹¹. Program ten stanowił punkt wyjścia dla prowadzonych przeze mnie prac nad efektywnym modelowaniem profilowania akustycznego w odwiertach.

Rozwiązanie w dziedzinie częstotliwości

Modelowanie problemu propagacji fal w dziedzinie częstotliwości stanowi alternatywę dla modelowania w dziedzinie czasu. Podejście takie niesie różnorodne korzyści i pozwala na łatwe modelowanie parametrów posiadających charakterystykę dyspersyjną (np. tłumienie w skałach) oraz dużo prostszą implementację warstwy PML, której używam jako absorpcyjny warunek brzegowy (metodę tę omawiam szerzej poniżej). Modelowanie w dziedzinie częstotliwości prowadzi również do naturalnej dekompozycji problemu na zbiór niezależnych podproblemów, które mogą być rozwiązane równoległe. Dla każdego z podproblemów, algorytm automatycznej adaptacji *hp* generuje optymalną siatkę (tzn. siatkę wygenerowaną automatycznie przez opisany powyżej algorytm *hp*-adaptacji, zapewniającą najszybszą redukcję błędów względnego rozwiązania przy minimalnym rozmiarze problemu dyskretnego) uwzględniającą wszystkie istotne dla danej częstotliwości własności rozwiązania. Z reguły, dla niższych częstotliwości, siatka jest dużo rzadsza niż dla wyższych częstotliwości przy zachowaniu tej samej jakości rozwiązania. Należy jednak podkreślić, że optymalna siatka dla większej częstotliwości nie jest tylko zagęszczoną optymalną siatką dla częstotliwości niższej. Takie rozwiązanie jest zazwyczaj niewystarczające. Dla różnych częstotliwości, osobliwości oraz wysokoenergetyczne składowe harmoniczne rozwiązania mogą być zlokalizowane w zupełnie innych rejonach obszaru obliczeniowego, a ich precyzyjne uwzględnienie wymaga wygenerowania zupełnie innych siatek.

Ponieważ zaproponowana metoda wariacyjna jest tylko asymptotycznie optymalna⁸, aby uzyskać dobrą zbieżność algorytmu, należy wygenerować odpowiednią siatkę początkową, która teoretycznie potrafi uwzględnić obecność dominujących fal w obszarze obliczeniowym.

⁹Demkowicz, L. and Buffa, A.: H^1 , $\mathbf{H}(\text{curl})$, and $\mathbf{H}(\text{div})$ -conforming projection-based interpolation in three dimensions. Quasi-optimal p -interpolation estimates. *Comput Method Appl M* 194:267-296, 2005.

¹⁰Demkowicz, L., Monk, P., Vardapetyan, L. and Rachowicz, W.: De Rham diagram for *hp* finite element spaces. *Comput Math Appl* 39(7-8):29-39, 2000.

¹¹Demkowicz, L., Kurtz, J., Pardo, D., Paszyński, M., Rachowicz, W. and Zdunek, A.: Computing with *hp* Finite Elements. II. Frontiers: Three-Dimensional Elliptic and Maxwell Problems with Applications. CRC Press, Taylor and Francis, 2007

W tym celu, generator siatki początkowej, biorąc pod uwagę sprężyste własności materiału (prędkość propagacji fal objętościowych) oraz częstotliwość, automatycznie dobiera rozmiar każdego elementu oraz anizotropowy stopień interpolacji wielomianowej w oparciu o znane kryteria dyspersyjne dla metody hp ¹².

Opisane powyżej techniki i założenia prowadzą do znacznych oszczędności obliczeniowych w porównaniu z metodą różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD), gdzie dla wszystkich częstotliwości musi być używana jedna, odpowiednio gęsta siatka. Zaprojektowanie jednej siatki, na której jest możliwe ujęcie wszystkich aspektów rozwiązania dla całego zakresu częstotliwości jest praktycznie niemożliwe. Dzięki rozwiązaniu problemu w dziedzinie częstotliwości, jakość otrzymanego rozwiązania nie degradowa się wraz ze wzrostem częstotliwości.

Mając wyznaczone rozwiązanie w dziedzinie częstotliwości można bardzo łatwo wygenerować rozwiązanie w dziedzinie czasu dla dowolnego źródła akustycznego: rozwiązanie w dziedzinie częstotliwości mnożone jest przez spektrum źródła, a następnie obliczana jest odwrotna transformata Fouriera (odpowiada to konwolucji sygnałów w dziedzinie czasu). Modelując ten sam problem w dziedzinie czasu musimy powtórzyć całą kosztowną symulację od początku, jeśli chcemy obliczyć rozwiązanie dla innego wzbudzenia.

Sformułowanie wariacyjne

Dla liniowej akustyki oraz dla ciał sprężystych używam klasycznych sformułowań wariacyjnych, w których niewiadomymi są, odpowiednio, pole ciśnień i pole przemieszczeń. Dodatkowo, powyższe modele można łatwo rozszerzyć o materiały lepko-akustyczne i lepko-sprężyste przez użycie zespolonych modułów elastyczności zdefiniowanych przez zespolone prędkości propagacji fal objętościowych. Prędkości te obliczam stosując model tłumienia Aki-Richardsa.¹³

Sformułowanie dla materiału porosprężystego oparłem o model Biota¹⁴ rozszerzony o zastosowanie dynamicznej przepuszczalności¹⁵, co pozwala na stosowanie tego modelu dla szerokiego zakresu częstotliwości. W sformułowaniu tym, liniowy porosprężysty materiał opisywany jest przez dwie pary równań różniczkowych cząstkowych: dwa kinematyczne równania ruchu oraz dwa równania konstytutywne wiążące ze sobą przemieszczenia (\mathbf{u}) i naprężenia ($\boldsymbol{\sigma}$) w fazie stałej oraz względne (względem fazy stałej) przemieszczenia (\mathbf{w}) i ciśnienie (p) opisujące fazę ciekłą. Tak więc, w sformułowaniu problemu występują dwie zmienne wyrażające naprężenia, $\boldsymbol{\sigma}$ i p , oraz dwie zmienne kinematyczne (odkształcenia), $\boldsymbol{\epsilon}$ oraz $\zeta = -\nabla \cdot \mathbf{w} = -\phi \nabla \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{u})$, definiujące pola fizyczne dla obu komponentów, odpowiednio fazy stałej i ciekłej (\mathbf{U} jest wektorem przemieszczenia fazy ciekłej, a ϕ oznacza porowatość materiału). Różne kombinacje zmiennych zależnych prowadzą do odmiennych sformułowań wariacyjnych, np. (\mathbf{u}, \mathbf{U}) , (\mathbf{u}, \mathbf{w}) lub (\mathbf{u}, p) . Warto podkreślić, że pierwsze dwa sformułowania

¹²Ainsworth, M.: Discrete dispersion relation for hp -version finite element approximation at high wave number, *SIAM J Numer Anal* 42(2):553–575, 2004.

¹³Aki, K. and Richards, P.G.: Quantitative seismology, 2nd ed.: University Science Books, 2002.

¹⁴Biot, M.A.: Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. *J Acoust Soc Am* 28:168–191, 1956.

¹⁵Johnson, D.L., Koplik, J. and Dashen, R.: Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous-media. *J Fluid Mech* 176:379–402, 1987.

prowadzą do problemu o $6n$ niewiadomych, a ostatnie do problemu o $4n$ niewiadomych; w praktyce oznacza to znaczne oszczędności obliczeniowe dla problemów rozwiązywanych w oparciu o sformułowanie trzecie.

W pracy [J8] wyprowadziłem sformułowanie mieszane (\mathbf{u}, p) będące uogólnieniem sformułowania zaproponowanego przez Atallę i in.¹⁶ Nowe sformułowanie uwzględnia dynamiczną przepuszczalność oraz izotropię poprzeczną. Ponadto, umożliwia ono łatwą implementację warunków brzegowych i warunków zszycia pomiędzy różnymi polami fizycznymi (przy założeniu, że pory w materiale porospężystym są w pełnym kontakcie hydraulicznym z płynem na zewnątrz tego materiału), a powstała w wyniku dyskretyzacji macierz sztywności jest symetryczna. W rezultacie dostajemy sformułowanie słabe dla problemu sprzężonego, o ciągłym polu przemieszczeń (\mathbf{u}) dla ośrodków sprężystych i porospężystych, oraz ciągłym polu ciśnień (p) dla ośrodków porospężystych i cieczy.

Sformułowanie we współrzędnych cylindrycznych

Ze względu na osiową symetrię problemu (przy założeniu, że sonda znajduje się na osi symetrii odwiertu, a otaczające odwiert formacje skalne również posiadają osiową geometrię) problem rozwiązano we współrzędnych cylindrycznych z użyciem dwuwymiarowego kodu MES [J2, J8]. Jednak niektóre źródła akustyczne, takie jak dipol czy kwadrupol, nie posiadają osiowo-symetrycznej charakterystyki promieniowania. Stosowane w profilowaniu akustycznym źródła, z bardzo dobrym przybliżeniem, posiadają azymutalną charakterystykę promieniowania opisywaną funkcją $\cos(n\theta)$, gdzie n oznacza rząd źródła (0 dla monopola, 1 dla dipola, 2 dla kwadrupola, itd.). Rozwiązanie problemu z tak zdefiniowanym źródłem sprowadza się do rozwiązania problemu w płaszczyźnie przekroju osiowego (rozwiązujemy problem dwuwymiarowy); jednakże, dla źródeł wyższego rzędu ($n \geq 1$), należy dodatkowo uwzględnić odkształcenia w kierunku transwersalnym (u_θ), co prowadzi do utraty symetrii sformułowania, i przekłada się na wzrost wymagań pamięciowych i obliczeniowych.

Sformułowanie równań liniowej sprężystości (i porospężystości) we współrzędnych cylindrycznych prowadzi do pojawienia się członów osobliwych (przy $r \rightarrow 0$) w tensorze odkształceń. W celu weryfikacji poprawności oryginalnego sformułowania, wyprowadziłem sformułowanie alternatywne z odpowiednio przeskalowanymi zmiennymi zależnymi $(p$ i $\mathbf{u})$, co prowadzi do usunięcia osobliwości ze sformułowania wariacyjnego [J2]. Symulacje numeryczne z wykorzystaniem obu sformułowań wykazały, iż obie metody prowadzą do praktycznie identycznych rozwiązań. Mimo obecności wyrazów osobliwych w pierwszym sformułowaniu, całkowanie numeryczne wewnątrz elementu wprowadza *implicite* dodatkowy człon kary, który wymusza zerowanie składników osobliwych na osi symetrii i w rezultacie prowadzi do poprawnych wyników.

Modyfikacja algorytmu adaptacji dla problemów z wieloma polami fizycznymi

W wersji oryginalnej, algorytm automatycznej adaptacji hp został zaprojektowany dla zagadnień eliptycznych i problemu równań elektromagnetyzmu Maxwella, gdzie niewiadomą

¹⁶Atalla, N., Hamdi, M.A. and Panneton, R.: Enhanced weak integral formulation for the mixed (u, p) poroelastic equations, *J Acoust Soc Am* 109:3065–3068, 2001.

jest jedno skalarne lub wektorowe pole fizyczne. Podstawowym parametrem dla algorytmu automatycznej adaptacji, w oparciu o który wybierana jest optymalna strategia adaptacji siatki, jest lokalna norma energetyczna błędu rozwiązania. W przypadku problemów sprzężonych, mamy do czynienia z co najmniej dwoma różnymi polami fizycznymi, które chcemy wyznaczyć. Błędy każdego z tych pól mierzone są z użyciem zupełnie innych norm energetycznych. Użycie sumy tych norm prowadziłyby do wymuszenia adaptacji jedynie w obszarze pola, dla którego norma energetyczna błędu byłaby największa, a więc algorytm adaptacji działałby zupełnie niepoprawnie. Sprowadzenie równań do postaci bezwymiarowej także nie rozwiązuje problemu: normy energetyczne dla różnych pól fizycznych wciąż mogą się dramatycznie różnić (nawet o kilka rzędów wielkości).

Kluczową kwestią dla właściwego działania algorytmu automatycznej adaptacji było odpowiednie zrównoważenie norm energetycznych. Opracowana przeze mnie metoda automatycznego skalowania składowych rozwiązania usuwa ten problem dla dowolnej liczby pól będących składowymi problemu sprzężonego i dzięki temu umożliwia efektywne stosowanie automatycznej adaptacji *hp* dla problemów sprzężonych z wieloma wielkościami fizycznymi [J2, J8]. W skrócie, na początku każdej iteracji algorytmu adaptacji skalujemy każde pole fizyczne jego normą energetyczną tak, że normy energetyczne przeskalowanych pól będą rzędu jedności. W konsekwencji, umożliwia to porównywanie względnych błędów wszystkich rozwiązań i poprawne działanie algorytmu automatycznej adaptacji typu *hp*.

Sformułowanie dla asymetrycznej geometrii

Założenie, iż sonda akustyczna znajduje się dokładnie na osi otworu wiertniczego, w wielu przypadkach jest założeniem nierealistycznym. Dotyczy to szczególnie otworów wierconych pod kątem, których znaczące fragmenty mogą być nawet poziome, a w przypadku technologii LWD masywna sonda praktycznie cały czas nie jest wycelowana w odwiercie. Symulacja profilowania akustycznego z umieszczoną niesymetrycznie sondą jest problemem dużo bardziej złożonym niż w przypadku, gdy znajduje się ona na osi symetrii. Przede wszystkim tracimy osiową symetrię geometrii rozpatrywanego problemu. Oczywistym rozwiązaniem jest modelowanie w trzech wymiarach, ale takie podejście implikuje znaczący wzrost nakładów obliczeniowych. Aby rozwiązać ten problem używając znacznie mniejszych zasobów, zaproponowano kombinację MES dla dyskretyzacji w kierunkach osiowym i radialnym oraz rozwinięcie w szereg Fouriera w kierunku quasi-azymutalnym [J1, J4, E2, E4]. Metoda ta została wcześniej pomyślnie zastosowana przez moich współautorów do modelowania profilowania elektromagnetycznego w odwiertach, dla nieosiowej sondy oraz dla otworów wierconych pod kątem (gdzie warstwy skalne nie są prostopadłe do otworu wiertniczego). Kluczem do sukcesu tej metody jest zastosowanie specjalnych transformacji współrzędnych dla pewnych podobszarów (np. obszaru płuczki w odwiercie, znajdującego się pomiędzy sondą a jego ścianą). Obszar fizyczny zawierający niesymetrycznie umieszczoną sondę jest odwzorowany w obszar kanoniczny posiadający osiową symetrię. Następnie, definiujemy w nowych współrzędnych sformułowanie wariacyjne, i rozwijamy w szereg Fouriera (w kierunku quasi-azymutalnym) złożone współczynniki pojawiające się w formach liniowych i biliniowych. Dzięki temu, problem redukuje się do sekwencji (słabo) sprzężonych problemów dwuwymiarowych, które muszą być rozwiązane jednocześnie. W zależności od tego, jak duże

jest zaburzenie symetrii modelowanego obszaru, konieczne jest użycie mniejszej lub większej liczby wyrazów w rozwinięciu Fouriera (dla typowych problemów wystarcza zazwyczaj kilka). Problem taki jest bardziej złożony obliczeniowo niż problem dwuwymiarowy, ale wymaga znacznie mniejszego czasu obliczeń i pamięci niż pełny odpowiadający mu model trójwymiarowy.

Niestety metoda ta nie może być zastosowana dla otworów wierconych pod kątem, gdzie konieczne byłoby wprowadzenie nowego układu współrzędnych dla materiału sprężystego i porosprężystego (dla niesymetrycznie umieszczonej sondy, definiujemy nowy układ współrzędnych jedynie w obszarze płynu wypełniającego otwór wiertniczy, który opisuje pole skalarne, co znacząco upraszcza problem). Zdefiniowanie tensora odkształcenia w dowolnym układzie współrzędnych prowadzi do nietrywialnych i bardzo skomplikowanych zależności, a znalezienie formuł analitycznych dla rozwinięcia Fouriera dla nowo powstałych współczynników jest praktycznie niemożliwe. Ponadto, przeprowadzone przez nas testy numeryczne dla akustycznego płynu anizotropowego (opisywanego przez dużo prostsze równania) wykazały, że rozwiązanie w warstwie PML dla nowych współrzędnych traci stabilność.

Metoda warstwy idealnie tłumiącej (PML)

Jak już to powyżej wspomniano, w moim programie używam warstwy PML jako warstwy absorbującej. Działanie tej metody polega na tym, że w zewnętrznej dodatkowej warstwie otaczającej właściwy obszar obliczeniowy wprowadzamy specyficzną transformację współrzędnych, mianowicie dodajemy część urojoną do współrzędnej normalnej do wewnętrznego brzegu warstwy tłumiącej (formalnie jest to przedłużenie analityczne). W rezultacie, fala rozchodząca się na zewnątrz obszaru (posiadająca dodatnią prędkość fazową w kierunku normalnym do brzegu warstwy PML) jest eksponencjalnie tłumiona, zaś fala propagująca się w kierunku przeciwnym (fala przychodząca) jest eksponencjalnie wzmacniana. W konsekwencji, radiacyjny warunek brzegowy, który ma wyeliminować falę przychodzącą, może być, po zastosowaniu warstwy idealnie tłumiącej, zastąpiony homogenicznym warunkiem brzegowym Dirichleta w nieskończoności. W praktyce, obszar nieskończony jest obcięty w skończonej odległości tak, że eksponencjalnie tłumiona fala osiąga wartość bliską maszynowego zera na zewnętrznym brzegu warstwy PML. Profil tłumienia w warstwie absorbującej zależy od funkcji opisującej część urojoną transformacji, i ma najczęściej postać wielomianową. Po zdefiniowaniu transformacji PML, należy rozszerzyć wszystkie występujące w równaniach operatory różniczkowe do przestrzeni zespolonej oraz odpowiednio przetransformować metrykę (jakobian przekształcenia).

W omawianym problemie, w warstwie idealnie tłumiącej stosuję zarówno transformację części urojonej (w celu wytłumienia fal wychodzących), jak również części rzeczywistej (by wytłumić fale zanikające) [J2, J5, J7, J8]. Ponieważ, w zależności od profilu tłumienia, w obszarze PML zazwyczaj występują duże gradienty i silne oscylacje rozwiązań, do poprawnego działania tej techniki konieczne jest zapewnienie dużej dokładności rozwiązania w warstwie tłumiącej. W przeciwnym wypadku, rozwiązanie będzie zawierać silne fale odbite od brzegu obszaru PML. Dlatego bardzo ważne jest zaprojektowanie odpowiedniej siatki dla dyskretyzacji warstwy PML. W metodach niższego rzędu konieczne jest zapewnienie

właściwej szerokości warstwy PML oraz odpowiednio dużej liczby elementów lub węzłów. W przypadku zastosowania metody automatycznej adaptacji *hp*, problem ten zupełnie znika — niezależnie od zadanej grubości warstwy, algorytm automatycznie wygeneruje optymalną siatkę, zapewniając eksponencjalną zbieżność metody.

Opracowując program adaptacyjnej metody *hp*, który umożliwia rozwiązywanie falowych problemów sprzężonych postawionych w różnych kombinacjach przestrzeni energetycznych (H^1 , $\mathbf{H}(\text{curl})$, $\mathbf{H}(\text{div})$ oraz L_2) wyprowadziłem ujednoczone transformacje pól fizycznych, operatorów różniczkowych (gradientu, rotacji i dywergencji) oraz wektora normalnego (\mathbf{n}) w obszarze PML [J3]. Transformacje te pozwalają zachować własność ciągu dokładnego (*exact sequence property*)¹⁰ dla diagramu de Rhama wiążącego ze sobą wymienione przestrzenie na poziomie dyskretnym i ciągłym, na elemencie fizycznym i elemencie odniesienia, bądź w obszarze obliczeniowym i obszarze PML.

Ponadto udało się pokazać, jak używając wyprowadzonych transformacji można bezpośrednio (i łatwo) modyfikować sformułowanie wariacyjne (czyli formy liniowe i biliniowe występujące w sformułowaniu) oraz definiować i obliczać jakobian odpowiadający dowolnej transformacji PML współrzędnych rzeczywistych we współrzędne zespolone. Transformacje te pozwalają zachować w obszarze PML oryginalną postać równań (wraz z ich fizyczną interpretacją) dla szerokiej klasy problemów; w takich przypadkach wprowadzenie transformacji PML sprowadza się do przedefiniowania parametrów fizycznych opisujących dany ośrodek.

W pracy [J8], na przykładzie operatora gradientu pola wektorowego i tensora odkształcenia pokazałem, jak formalnie wygląda transformacja PML dla pól tensorowych. Dzięki temu, można stosować opracowaną przeze mnie metodologię modyfikacji sformułowania wariacyjnego w obszarze warstwy idealnie tłumiącej dla problemów sprężystości, poro-sprężystości i mechaniki płynów. Jednak dla tej klasy problemów, transformacja PML nie zawsze prowadzi do zachowania oryginalnej postaci równań, np. w przypadku liniowej izotropowej sprężystości, w obszarze PML tracimy małe symetrie tensora współczynników sprężystości (jeśli zinterpretujemy transformację PML jako transformację tensora) albo, równoważnie, stwierdzamy, że odkształcenia po transformacji PML nie mogą być dalej zinterpretowane jako odkształcenia (fizyczne). Tak więc, postać równań nie jest zachowana i formalnie wychodzimy poza klasyczną teorię liniowej sprężystości.

Niefizyczne rozwiązania jako efekt zastosowania warstwy idealnie tłumiącej

Jak pokazuje doświadczenie, w pewnych przypadkach zastosowanie PML jako warstwy absorbującej prowadzi do błędnych (niefizycznych) rozwiązań. Potwierdza to szereg testów numerycznych przeprowadzonych przeze mnie dla profilowania akustycznego w obecności sondy LWD [J6, J7, E5]. Sonda taka zajmuje dużą część otworu wiertniczego; jest to masywna grubościenna stalowa rura odznaczająca się bardzo dużą wytrzymałością mechaniczną. Sonda posiada wewnętrzny kanał, przez który z powierzchni tłoczona jest płuczka (specjalnie dobrany płyn), która służy do chłodzenia wiertła oraz unosi na powierzchnię wykruszoną skałę. Z punktu widzenia akustyki, sonda stanowi falowód, w którym (w zależności od spektrum częstotliwościowego źródła) mogą zostać wzbudzone różne rodzaje modów falowych posiadających z reguły dużą dyspersję. Jak pokazuje dokładna analiza teoretyczna, niektóre

z modów własnych sondy mogą posiadać w pewnych (zazwyczaj dość wąskich) pasmach częstotliwości ujemne prędkości fazowe (są to tzw. *back-propagating modes*). Oczywiście, wszystkie mody posiadają dodatnie prędkości grupowe, jako że energia jest propagowana od źródła na zewnątrz wzdłuż falowodu. Konstrukcja metody PML zakłada, że w warstwie absorbującej wszystkie fale wychodzące są tłumione, a fale przychodzące są eksponencjalnie wzmacniane (docelowo, mody te są eliminowane przez nałożenie zerowych warunków Dirichleta na zewnętrznym brzegu warstwy PML), a kryterium służące do rozróżnienia tych dwóch grup fal oparte jest na znaku prędkości fazowej. W świetle tego, oczywistym staje się fakt, iż w obecności modów posiadających ujemną prędkość fazową, metoda PML nie będzie działać poprawnie: wyeliminuje niektóre fizyczne rozwiązania, a zachowa te — odpowiadające im — niefizyczne. Podobne zjawisko opisano w literaturze dla pewnych anizotropii materiału sprężystego¹⁷ oraz propagacji fal elektromagnetycznych w falowodach¹⁸. Jednakże, o ile mi wiadomo, wspomniany problem nie był dotychczas zauważony w kontekście modelowania profilowania akustycznego. Przyczyną tego jest prawdopodobnie fakt, iż używane dotąd metody modelowania, ze względu na ograniczoną precyzję oraz przyjęte uproszczenia, nie rozwiązały wszystkich fal występujących w tym problemie. Wydaje się, że modyfikacja techniki PML umożliwiająca jej poprawne działanie w omawianych powyżej przypadkach jest niemożliwa, z uwagi na konstrukcję samej metody. Kwestia opracowania absorpcyjnych warunków brzegowych dla problemów sprzężonych, w których występują propagujące się wstecznie mody falowe, jest wciąż otwarta.

W celu przewyciężenia problemu niestabilności PML, zaproponowałem prostą technikę polegającą na wytłumieniu fal w sondzie LWD (o ile nie jesteśmy zainteresowani modami falowymi propagującymi się w sondzie) poprzez użycie lepko-sprężystego modelu dla sondy [J6]. Ponieważ zazwyczaj niepożądane mody mają relatywnie małą amplitudę, dlatego wprowadzenie umiarkowanego tłumienia w narzędziu zwykle powoduje, że amplitudy tych modów są „niewidoczne” dla warstwy PML z uwagi na ograniczoną precyzję obliczeń oraz błędy zaokrągleń. Przeprowadzone symulacje numeryczne wykazały skuteczność zaproponowanej metody [J6, J7, E4, E5, E9].

Implementacja

Ze względu na dużą złożoność obliczeniową omawianego problemu, położyłem duży nacisk na efektywną implementację adaptacyjnej MES. W tym celu zreorganizowałem większość struktur danych i algorytmów pomocniczych w oryginalnym kodzie, zaimplementowałem statyczną kondensację oraz szybkie całkowanie, które wykorzystuje strukturę iloczynu tensorowego funkcji kształtu i w rezultacie redukuje liczbę operacji potrzebną do przecałkowania macierzy sztywności na pojedynczym elemencie z $\mathcal{O}(p^6)$ do $\mathcal{O}(p^5)$ (p jest stopniem interpolacji wielomianowej na elemencie skończonym). Ponadto, zrównolegliłem w oparciu o środowisko OpenMP dominujące obliczeniowo fragmenty algorytmu (składanie

¹⁷Bécache, E., Fauqueux, S. and Joly, P.: Stability of perfectly matched layers, group velocities and anisotropic waves, *J Comput Phys* 188(2):399–433, 2003.

¹⁸Loh, P.-R., Oskooi, A.F., Ibanescu, M., Skorobogatiy, M. and Johnson, S.G.: Fundamental relation between phase and group velocity, and application to the failure of perfectly matched layers in backward-wave structures, *Phys Rev E* 79(6):065601, 2009

globalnego układu równań, projekcje na ścianach i krawędziach, obliczanie norm i błędów na elementach). Program posiada interfejsy do komercyjnych solverów MUMPS i Pardiso oraz do dedykowanych równoległych solverów opracowanych specjalnie dla adaptacyjnej MES typu *hp* [E1]. W rezultacie, uzyskałem znaczące przyspieszenie sekwencyjnych fragmentów algorytmu, prawie liniowe przyspieszenie dla części zrównoleglonych oraz znaczne zmniejszenie wymagań pamięciowych. Większość problemów, które modelowałem za pomocą opracowanego przeze mnie programu, może być efektywnie symulowana w akceptowalnym praktycznie czasie na współczesnym laptopie posiadającym wielordzeniowy procesor.

Zastosowania

Opracowany przeze mnie program komputerowy, implementujący opisane powyżej techniki, zastosowałem do modelowania szeregu szczegółowych problemów profilowania akustycznego w odwiertach. W pracach [J5, E3, E8, E13] przedstawiłem i zinterpretowałem wyniki uzyskane dla modelowania w obecności sond typu WL (które są standardowo używane w czasie eksploatacji odwiertu) dla formacji skalnych posiadających szczeliny, warstwowanie, oraz dla odwiertów niezarurowanych i zarurowanych o różnym stopniu ich zacementowania. Analogiczne rezultaty dla sondy typu LWD, używanej w czasie wiercenia otworu, przedstawiłem w artykułach [J6, J7, E5].

W raporcie [E9] porównałem jakość oszacowania prędkości fali poprzecznej formacji z użyciem źródła dipolowego i sondy *wireline* oraz źródła kwadrupolowego i sondy LWD. Zbadałem również możliwość oceny parametrów geometrycznych szczelin skalnych wypełnionych płynem w oparciu o metodę profilowania akustycznego [E7]. Zajmowałem się także problemem akustycznej detekcji szczelin w zarurowanych odwiertach [E13]. W pracach [J1, J4, E2, E4] szczegółowo przeanalizowano zjawiska wywołane niesymetrycznym umieszczeniem sondy akustycznej w odwiercie.

Opracowany przeze mnie algorytm MES został wykorzystany do generacji dokładnych funkcji wrażliwości dla krzywych dyspersji odpowiadających różnym modom propagującym się w odwiercie otoczonym przez formacje skalne o różnej geometrii i składzie. Funkcje te są podstawą dla metody szybkiej generacji syntetycznych profili prędkości propagacji fal P, S i Stoneleya w formacji skalnej o zadanych parametrach mechanicznych i geometrycznych. Metoda ta, może być dalej wykorzystana jako metoda bezpośrednia dla problemu odwrotnego wyznaczania własności mechanicznych oraz geometrii formacji skalnej otaczającej odwiert na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych uzyskanych w trakcie profilowania akustycznego odwiertu [E10, E11, E12].

Za pomocą opracowanego przeze mnie programu zaprojektowano optymalny izolator akustyczny dla nowej sondy akustycznej LWD konstruowanej przez firmę Baker-Hughes Inc. Jest on umieszczony pomiędzy nadajnikiem a zespołem odbiorników i ma na celu wytłumienie własnych modów falowych propagujących się w masywnej grubościenniej sondzie w paśmie częstotliwości, w którym ma operować budowana sonda. Izolator działa na zasadzie filtru mechanicznego — posiada serię wnęk na swojej zewnętrznej powierzchni. Odpowiedni dobór rozmiarów i rozmieszczenia tych wnęk pozwala na znaczne wytłumienie niepożądanych modów własnych.

Podsumowanie

Opracowane przeze mnie metody oraz algorytmy, opublikowane w pracach J1-J8 oraz E1-E13, stanowią istotny wkład do rozwoju mechaniki obliczeniowej i pozwalają na dokładniejsze modelowanie trudnych problemów sprzężonych. Wyniki moich badań są opublikowane w najbardziej renomowanych czasopismach naukowych w dziedzinie mechaniki obliczeniowej i były prezentowane na licznych prestiżowych konferencjach międzynarodowych oraz konsorcjach badawczych.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

5.1. Modelowanie procesów przeróbki plastycznej

Znaczącą część moich badań do roku 2008 poświęciłem modelowaniu numerycznemu procesów przeróbki plastycznej, a w szczególności procesowi spęczania i rozciągania. Tematyce tej poświęciłem również moją pracę doktorską, obronioną w 2005 roku, w której opracowałem dwu- i trójwymiarowy program MES do symulacji plastometrycznej próby spęczania. W programie tym, proces plastycznego odkształcania metalu jest modelowany jako quasi-stacjonarny, a rozkład ciśnień i pole prędkości w danym stanie stacjonarnym są opisywane przez nieliniowe równanie Stokesa. Model uwzględnia również nieliniowy model tarcia. Użycie klasycznych elementów skończonych wymagało odpowiedniej metody stabilizacji sformułowania słabego (zastosowałem wariant metody SUPG). Cały kod został zrównoleglony w oparciu o środowisko OpenMP.

W tym czasie byłem wykonawcą w projektach badawczych:

- 2007 – 2008 Projekt badawczy zamówiony przez ArcelorMittal:
Hybrydowy system wspomaganie projektowania technologii produkcji taśm szerokich walcowanych na gorąco w ArcelorMittal.
(główny wykonawca)
- 2006 – 2008 Projekt badawczy KBN nr 62R72006C06731:
Opracowanie i wdrożenie procedur doboru chłodziw hartowniczych w produkcji części do silników lotniczych, w warunkach hartowni Pratt&Whitney Kalisz.
- 2005 – 2008 Projekt badawczy MEiN 3 T 08 B 055 29:
Model do symulacji zjawisk w materiałach wykorzystujący równoległy kod trójwymiarowy *hp*-adaptacji oraz wieloskalowy model konstytutywny.
- 2002 – 2005 Projekt badawczy MEiN 4T08A 062 23:
Model i parametry kształtowania materiałów w zakresie dwufazowym.
- 2003 – 2006 Projekt badawczy T08B 009 24:
Komputerowy program do analizy odwrotnej prób plastometrycznych, wykorzystujący obiektowo zorientowane programowanie.
- 2002 – 2004 Projekt europejski COST 526:
Optimization of Tool Shape in the Tests Aiming at Identification of Models Describing Rheological and Mechanical Properties of Metallic Alloys.
- 2001 – 2004 5-ty Europejski Projekt Ramowy NAS-TENSTAND:

Computer Controlled Tensile Testing Machines: Validation of European Standard EN 10002 Part 1: Finite Analysis and Inverse Modelling.
2000 – 2003 5-ty Europejski Projekt Ramowy TESTIFY:
Mechanical tests and identification of parameters for metal forming processes.

W przypadku pierwszego z wymienionych grantów byłem twórcą programu komputerowego modelującego numerycznie cały proces produkcji blach w nowej walcowni blach gorących w hucie ArcelorMittal w Krakowie. Linia technologiczna obejmuje: nawrotną walcarkę wstępną, aktywne skrzynie, siedem walcarek wykańczających oraz sekcję chłodzenia. Algorytm ten umożliwia szczegółowe modelowanie całego procesu walcowania, obróbkę cieplną, mechaniczną oraz ewolucję mikrostruktury. Program pozwala również na wyznaczenie optymalnych parametrów procesu dla projektowanej geometrii blach.

Lista najważniejszych publikacji z tego okresu jest następująca:

- P1: Danuta Szeliga, Paweł J **Matuszyk**, Roman Kuziak, and Maciej Pietrzyk. Identification of rheological parameters on the basis of various types of plastometric tests. *J Mater Process Tech*, 125-126:150–154, 2002. [IF 1.1, 24 pkt. MNiSW, mój udział 30%]
- P2: Danuta Szeliga, Paweł J **Matuszyk**, Valeriy Pidvysotsky, and Maciej Pietrzyk. 3D model of cube compression for inverse analysis. In Maciej Pietrzyk, Zbigniew Mitura, and Jacek Kaczmar, editors, *ESAFORM: the 5th international conference on Material forming: Kraków, April 14–17, 2002*. Publishing House "Akapit", 2002
- P3: Paweł J **Matuszyk**. Object-oriented realization of the FE solver for compression test. *Computer Methods in Materials Science*, 4(4):127–143, 2004
- P4: Valeriy Pidvysotsky, Paweł J **Matuszyk**, and Hermann Bloching. Analysis of the influence of the specimen shape on the zone of homogeneous stress in tensile test. *Materials Testing – Materialprüfung*, 48(10):498–503, Oct 2006. [IF 0.134, 13 pkt. MNiSW, mój udział 33%]
- P5: Paweł J **Matuszyk** and Krzysztof Boryczko. A parallel preconditioning for the nonlinear Stokes problem. *Lect Notes Comput Sc*, 3911:534–541, 2006. [IF 0.402, 10 pkt. MNiSW, mój udział 50%]
- P6: Łukasz Rauch, Łukasz Madej, and Paweł J **Matuszyk**. Knowledge based optimization of the manufacturing processes supported by numerical simulations of production chain. In Richard Curran, Shuo-Yan Chou, and Amy Trappey, editors, *Collaborative Product and Service Life Cycle Management for a Sustainable World*, Advanced Concurrent Engineering, pages 435–442. Springer London, 2008
- P7: Łukasz Rauch, Łukasz Madej, Roman Kuziak, Paweł J **Matuszyk**, Maciej Pietrzyk, Bogusław Gierulski, and Adam Chochorowski. Hybrid system supporting design of rolling technology of flat products in ArcelorMittal. *Hutnik Wiadomości Hutnicze*, 76(4):290–296, 2009. [9 pkt. MNiSW, mój udział 16%]

5.2. Modelowanie dynamiki pieszych

Moim oryginalnym wkładem do modelowania dynamiki pieszych za pomocą automatów komórkowych była idea uwzględnienia w modelu znanej z socjologii teorii dystansów socjalnych, opisaną po raz pierwszy przez Edwarda Halla. Dystanse personalne odzwierciedlają stopień relacji interpersonalnych pomiędzy dwiema osobami, a ich wielkość jest uwarunkowana kulturowo. W warunkach, gdy niewiele nieznanym sobie osobom zajmuje dostatecznie dużą przestrzeń, każda z nich będzie się starała zachować jak największy dystans od pozostałych osób, co znajdzie odzwierciedlenie w równomiernym rozkładzie przestrzennym. Sytuację te mogą zmodyfikować dodatkowe czynniki socjologiczne, takie jak emocjonalny stosunek do innej osoby, płeć osoby, itp. Możliwe jest także załamanie reguł narzucanych przez dystanse socjalne, np. w czasie jazdy zatłoczoną windą czy środkiem transportu publicznego. Przeniesienie tej teorii do modelu automatów komórkowych sprowadza się do zdefiniowania dla każdego osobnika pewnego pola potencjalnego, które go otacza i które może oddziaływać na inne osoby. Dzięki takiemu podejściu, udało się w realistyczny sposób modelować takie zjawiska jak np. zajmowanie wolnych miejsc w autobusie czy kinie przez kolejno dochodzące osoby oraz modelować proces ewakuacji pomieszczeń. Dodatkowo, założono, że każda osoba, będzie opisywana na kwadratowej siatce automatu komórkowego za pomocą elipsy (co mniej więcej odpowiada rzutowi stojącej postaci ludzkiej na poziomą powierzchnię) mogącej przyjmować różne (dyskretne) orientacje w przestrzeni. W ten sposób, klasyczny automat komórkowy z sąsiedztwem Moora został wzbogacony o dodatkowe reguły wykluczające możliwość zajęcia dwóch sąsiednich komórek przez osoby, które są do siebie ustawione pod pewnymi kątami. Dokładniejszy opis tych idei oraz ich implementacji został opublikowany w poniższych pracach:

- D1: Jarosław Wąs, Bartłomiej Gudowski, and Paweł J **Matuszyk**. Social distances model of pedestrian dynamics. *Lect Notes Comput Sc*, 4173:492–501, 2006. [IF 0.402,10 pkt. MNiSW, mój udział 34%]
- D2: Jarosław Wąs, Bartłomiej Gudowski, and Paweł J **Matuszyk**. New cellular automata model of pedestrian representation. *Lect Notes Comput Sc*, 4173:724–727, 2006. [IF 0.402,10 pkt. MNiSW, mój udział 33%]

5.3. Automatyczna adaptacja typu hp dla problemu Stokesa

W publikacjach [S1, S2 i S3] przedstawiono modyfikację oryginalnej metody hp do rozwiązania quasi-stacjonarnego problemu Stokesa. W tym przypadku główną trudność stanowi odpowiedni dobór podprzestrzeni wielomianowych aproksymujących pola ciśnień i prędkości, spełniających dyskretny warunek Ladyżenskiej-Brezzięgo-Babuški, zapewniający stabilność i jednoznaczność rozwiązania numerycznego. Metody klasyczne używają specjalnie zaprojektowanych elementów skończonych albo odpowiedniej metody stabilizacji dyskretnego sformułowania wariacyjnego. Ze względu na fakt, iż nasz algorytm ma w zamyśle używać adaptacji typu p , a co więcej, zmiana stopnia interpolacji może być dokonywana lokalnie na każdym węźle wyższego rzędu (na krawędzi, bądź we wnętrzu elementu), prostym rozwiązaniem było użycie odpowiedniej metody stabilizacji. Dla problemu

Stokesa odpowiednią metodą jest odmiana metody SUPG¹⁹, prowadząca do nieliniowego sformułowania Petrova-Galerkina. Metoda ta może być w prosty sposób przekształcona do metody liniowej przez założenie, że nieliniowy człon w sformułowaniu wariacyjnym potraktujemy jako dodatkową siłę działającą na układ i przeniesimy go na prawą stronę równania. Dodatkowo, unikamy w ten sposób obliczania drugich pochodnych pola prędkości. Kolejne iteracje algorytmu adaptacji siatki równocześnie służą jako iteracje linearyzacji problemu nieliniowego. Sukcesywna rekonstrukcja dewiatora tensora naprężenia ($2\mu\dot{\epsilon}$), koniecznego do obliczenia dodatkowej siły działającej na układ, poprzez projekcję L^2 pomiędzy dwoma zagnieżdżonymi siatkami domyka cały algorytm. Dzięki takim modyfikacjom, algorytm MES z automatyczną adaptacją typu *hp* zapewnia eksponencjalną zbieżność metody dla stacjonarnego problemu Stokesa.

- S1: Paweł J **Matuszyk** and Maciej Paszyński. Fully automatic *hp*-adaptive finite element method for the Stokes problem in two dimensions. *Comput Method Appl M*, 197:4549–4558, 2008. [IF **2.129**, 24 pkt. MNiSW, mój udział **50%**]
- S2: Paweł J **Matuszyk** and Maciej Paszyński. Extensions of the 2D automatic *hp* adaptive FEM for Stokes and non-stationary heat transfer problems. In *USNCCM IX: ninth US National Congress on Computational Mechanics*, pages 235–236, 2007
- S3: Paweł J **Matuszyk** and Maciej Paszyński. Fully automatic *hp* finite element method for Stokes problem in two dimensions. In *CMM-2007: 17th international conference on Computer Methods in Mechanics: June 19–22, 2007, Łódź-Spała, Poland*, pages 269–270. Polish Academy of Sciences. Department of Technical Sciences ; Polish Association for Computational Mechanics ; Technical University of Łódź, 2007

5.4. Automatyczna adaptacja typu *hp* dla problemów dyfuzji

Kolejną klasą problemów, dla której rozszerzono *hp*-adaptacyjną MES, jest grupa niestacjonarnych problemów dyfuzji opisywanych przez klasyczne paraboliczne równanie różniczkowe. W tym celu, zastosowałem MES dla dyskretyzacji przestrzeni oraz metodę różnic skończonych (schemat niejawny, Cranka-Nicolsona lub podobny) do całkowania w czasie. Rozszerzyłem również algorytm o możliwość projekcji (L^2) rozwiązania pomiędzy dwoma, niekoniecznie zagnieżdżonymi siatkami obliczeniowymi. Umożliwiło to jednoczesną adaptację siatki typu *hp* w danym kroku czasowym w celu zminimalizowania błędu rozwiązania oraz ewolucję siatki w czasie, która dopasowuje się do ewoluującego rozwiązania. Procedura całkowania po czasie wymagała implementacji w kodzie dwóch wzajemnie niezależnych rodzin zagnieżdżonych siatek, szybkiego algorytmu projekcji rozwiązania pomiędzy takimi siatkami oraz doboru optymalnego algorytmu generacji siatki początkowej dla kolejnego kroku czasowego [D3]. Zmodyfikowany algorytm zastosowano do symulacji transportu ciepła [D4, S2] oraz, w połączeniu z automatami komórkowymi (CA), do wieloskalowego modelowania przemian fazowych w stali. W tym ostatnim przypadku, model automatów

¹⁹Hughes, T.J.R. and Franca, L.P.: A new FEM for computational fluid dynamics: VII. The Stokes problem with various well-posed boundary conditions: symmetric formulations that converge for all velocity/pressure spaces. *Comput Method Appl M*, 65:85–96, 1987.

komórkowych służy do bezpośredniego modelowania procesu przemiany fazowej pomiędzy frakcją stałą i ciekłą [D1, D5] albo pomiędzy ferrytem a austenitem [D2]. Koncentracje faz są określone przez wartości zmiennych stanu, a ich ewolucja w czasie opisywana jest przez odpowiednie reguły przejścia sformułowane w oparciu o równania termodynamiki. Ponieważ komórki CA nie pokrywają się z siatką MES, parametry mechaniczne i termodynamiczne obliczone przez CA dla danego kroku czasowego (gęstość, przewodność cieplna, współczynnik dyfuzji, ciepło właściwe oraz dodatkowe ciepło generowane na skutek przemiany fazowej) są wygładzane w przestrzeni za pomocą techniki wygładzonej hydrodynamiki cząstek (SPH) o wielomianowym jądrze, a następnie wartości obliczone w punktach całkowania przekazywane są do algorytmu MES. Moduł MES opisywanego algorytmu hybrydowego odpowiada za równoczesne modelowanie transportu ciepła oraz masy w krzepnącym stopie. Oba procesy opisuje klasyczne równanie dyfuzji.

Przedstawiony algorytm efektywnie modeluje skomplikowane interakcje pomiędzy różnorodnymi zjawiskami odpowiedzialnymi za proces krzepnięcia stali (np. krystalizacja powoduje efekty cieplne, które wpływają na kierunek i prędkość przemiany fazowej, przepływu ciepła i masy, itp.). Dodatkowo, proces przemiany fazowej jest silnie zlokalizowany w pobliżu tzw. frontów rekrytalizacji tworzących wydłużone i wąskie podobszary, gdzie wymagana jest odpowiednio duża dokładność (ponieważ występują tam duże gradienty funkcji opisujących rozwiązanie). Zastosowanie automatycznej adaptacji siatki typu *hp* w przestrzeni i w czasie zapewniło odpowiednio wysoką dokładność modelu przy użyciu rozsądnych rozmiarów siatek obliczeniowych. Dzięki zastosowaniu opisanego algorytmu możliwe jest dokładniejsze określenie mikrostruktury stali w czasie procesu i po procesie przeróbki cieplnej. Umożliwia to lepsze zrozumienie całego procesu, dokładniejsze oszacowanie użytkowych własności otrzymanego stopu, oraz zaprojektowanie optymalnej metody przeróbki cieplnej stopu tak, aby produkt końcowy posiadał pożądane parametry mechaniczne.

- D1: Maciej Paszyński, Jerzy Gawąd, Paweł J **Matuszyk**, Łukasz Madej, and Dorota Podorska. Phase transition simulations for solidification of Fe-C alloy with cellular automata interfaced with self-adaptive *hp* finite element method for non-stationary heat and mass transport problems. *Computer Methods in Materials Science*, 8(4):179–185, 2008. [6 pkt. MNiSW, mój udział **20%**]
- D2: Jerzy Gawąd, Maciej Paszyński, Paweł J **Matuszyk**, and Łukasz Madej. Cellular automata coupled with *hp*-adaptive finite element method applied to simulation of austenite-ferrite phase transformation with a moving interface. *Steel Research International*, 79:579–586, 2008. [**IF 0.344**, 20 pkt. MNiSW, mój udział **25%**]
- D3: Maciej Paszyński and Paweł J **Matuszyk**. Different mesh management strategies for non-stationary self-adaptive *hp* finite element method. *Computer Methods in Materials Science*, 10(1)(1):42–51, 2010. [6 pkt. MNiSW, mój udział **50%**]
- D4: Paweł J **Matuszyk** and Maciej Paszyński. Fully automatic 2D *hp*-adaptive finite element method for non-stationary heat transfer. In Eugenio Oñate, Roger Owen, and Benjamín Suárez, editors, *COMPLAS IX: COMPUTATIONAL PLASTICITY: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*, pages 931–934. International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), 2007

- D5: Maciej Paszyński, Paweł J **Matuszyk**, Jerzy Gawąd, and Łukasz Madej. Phase transition modeling with CA merged with *hp*-adaptive FEM for the heat and mass transport problems. In *KomPlasTech 2008: Informatyka w Technologii Metali: materiały XV konferencji: Korbielów, 6–9 stycznia 2008*, pages 121–128. Wydawnictwo Naukowe Akapit, 2008

6. Statystyki i pozostała działalność naukowo-dydaktyczna

- Liczba opublikowanych prac z podziałem na kategorie

Typ publikacji (nazwa bazy)	Liczba
Journal Citation Report	12 (+ 3 w druku)
Web of Science (z pominięciem powyższych)	4
Scopus (z pominięciem powyższych)	3
Inne czasopisma (z pominięciem powyższych)	4
Materiały konferencyjne i pozostałe (z pominięciem powyższych)	48

- Sumaryczny impact factor moich publikacji (z uwzględnieniem zaakceptowanych do druku) według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem ich opublikowania, wynosi **27.042**, a suma punktów MNiSW wynosi **495**. Wartości skalowane moim udziałem procentowym wynoszą odpowiednio **15.690** dla impact factor i **272** dla punktów MNiSW.
- Wskaźniki cytowań

Nazwa bazy	Liczba cytowań	Indeks Hirscha
Web of Science	68	5
Scopus	70	5
Google Scholar	153	7

- Wygłosiłem **18** referatów na międzynarodowych konferencjach, a wyniki moich badań były prezentowane łącznie na **54** konferencjach i seminariach.
- Uczestniczyłem w 3 badawczych projektach europejskich i 5 projektach krajowych.
- Byłem przewodniczącym sesji na międzynarodowych konferencjach:
 - Society of Exploration Geophysicists (SEG) International Exposition and 81th Annual Meeting, San Antonio, 2011.
 - FE Rodeo 2013, Austin, Texas, USA.
- Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki
 - Współtworzyłem nowe całościowe programy nauczania dla nowo utworzonych kierunków an Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, AGH w Krakowie
 - * Informatyka stosowana
 - * Edukacja informatyczno-technicznaNależy zaznaczyć, że były to ówczesnie nowatorskie kierunki w skali kraju, łączące w sobie edukację z zakresu informatyki oraz szeroko rozumianej metalurgii i inżynierii materiałowej.

- Opracowałem materiały do prowadzonych przeze mnie wykładów i laboratoriów z przedmiotów: Wstęp do informatyki, Języki programowania, Metoda elementów skończonych, Programowanie proceduralne, Programowanie obiektowe, Algorytmy i struktury danych, Kompilatory.
 - Wypromowałem 4 magistrów.
 - W 2007 roku otrzymałem zespołową nagrodę Rektora III stopnia za osiągnięcia dydaktyczne.
 - W latach 2007-2008 kierowałem uczelnianym zespołem koordynującym współpracę Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie z firmą IBM.
- Staże i wyjazdy zagraniczne:
 - XII 2003 kurs "Nonlinear Finite Element Analysis" prowadzony przez T.J.R. Hughesa i T. Belytschkę, ZACE Services Ltd, Paryż, Francja
 - X–XII 2005 "Special Radon Semester on Computational Mechanics" Johann Radon Institute for Computational and Applied Mathematics (RICAM), Austrian Academy of Sciences (ÖAW), Linz, Austria
 - III–IV 2005 visiting research fellow National Physical Laboratory, Teddington, Wielka Brytania
 - 2008 – 2013 postdoc i research associate The University of Texas at Austin, USA
 - Jestem recenzentem publikacji w następujących czasopismach:

Tytuł	5Y-IF	od roku
Computer Methods in Material Science	–	2008
Computer Science Journal	–	2014
Geophysics	2.046	2012
Wave Motion	1.413	2012
Computers & Mathematics with Applications	2.062	2012
Geophysical Prospecting	1.660	2014
Computational Geosciences	1.802	2014
Journal of Computational Science	1.610	2015

Sześć ostatnich znajduje się w bazie JCR.

- W 2013 roku recenzowałem grant naukowy dla Narodowego Centrum Nauki.
- W 2015 zostałem przyjęty do Society of Exploration Geophysicists (SEG) na prawach członka zwyczajnego.

P. Matuszyk