

Dr hab. inż. Marek Lefik, prof. PŁ

Politechnika Łódzka

Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

Katedra Geotechniki i Budowli Inżynierskich

Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź.

Łódź, 19 lutego 2016 roku.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Strzeleckiego  
„Model termofiltracji w obszarze oddziaływania generatora zgazowania węgla”**

**1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała Rady Wydziału Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej z dnia 13 stycznia 2016 r.

**2. Przedmiot oceny**

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska napisana przez mgr inż. Michała Strzeleckiego z Zakładu Górnictwa na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Jan Kudelko, profesor Politechniki Wrocławskiej, z Zakładu Górnictwa na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej. Praca liczy 192 strony, jest podzielona na 8 rozdziałów, ilustruje ją 110 rysunków i wykresów oraz 3 tabele. Spis literatury zawiera 142 pozycje, spis większości oznaczeń jest częścią rozdziału trzeciego tej pracy. Dołączone są dwa załączniki zawierające skrypty dla programu FlexPDE. Streszczenia w języku polskim umieszczono na początku pracy.

**3. Ogólna charakterystyka rozprawy, ocena trafności doboru jej tematu i tytułu, sformułowania tez, jej układu i doboru źródeł**

Model teoretyczny termo-filtracji jest punktem centralnym rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Michała Strzeleckiego. Autor rozprawy przedstawia kilka modeli teoretycznych zjawiska filtracji i termo-filtracji. Modele te porównuje jakościowo i ilościowo z modelem klasycznym, przedstawionym w rozdziale drugim. O różnicach jakościowych decydują założenia upraszczające, które leżą u podstaw rozwijanych teorii. Są to założenia dotyczące, między innymi, ściśłości bądź nieściśłości szkieletu gruntowego, wyrównania bądź zróżnicowania temperatury fazy płynnej i stałej oraz liczne założenia formalne dotyczące, na



przykład, zapisu funkcjonału energii ośrodka lub postać rozwinięcia wybranych wielkości w szereg asymptotyczny w sąsiedztwie wartości początkowych.

Różnice ilościowe pomiędzy wyprowadzonymi modelami termo-filtracji zastosowanej do opisu ośrodka porowatego wypełnionego wodą, w przypadku stałej lub zmiennej temperatury badano przy pomocy analizy numerycznej, mianowicie – metody elementów skończonych. Zastosowano komercyjny kod pozwalający zastosować metodę ES do rozwiązania zagadnienia początkowo-brzegowego przedstawionego w formie układu równań różniczkowych cząstkowych. Uważam, że wyprowadzenie modeli teoretycznych termo-filtracji, które noszą cechy nowości oraz ich analiza ilościowa i jakościowa stanowią główne osiągnięcie badawcze Doktoranta.

W pracy doktorskiej przedstawiono ponadto dwa zastosowania inżynierskie opracowanych modeli. Pierwszy z nich to zastosowanie opracowanego modelu do opisu numerycznego przepływu wód podziemnych w otoczeniu gazogeneratora, drugi to zastosowanie modelu termo-filtracji do wyjaśnienia jakościowego zjawiska ruchomych piasków na terenach pustynnych.

Pierwsze z tych zastosowań jest bardzo ważnym elementem pracy, wpływa na jej wysoką ocenę. Proces zgazowania węgla w złożu jest procesem zarówno trudnym do opisanie teoretycznego jak i niezwykle ważnym z punktu widzenia gospodarki i rozwoju energetyki opartej na wykorzystaniu węgla. Podjęcie się tego zadania podnosi wartość pracy i nadaje jej walor stosowalności w realnych zagadnieniach inżynierskich. Pozwala też uznać, że Doktorant umiał znaleźć niezwykle istotne zastosowanie praktyczne dla wyników swojej działalności naukowej. Zadanie zgazowania węgla w złożu jest niezwykle trudne, zastosowanie opracowanej teorii do modelowania tego procesu wymagało dużej odwagi od Doktoranta.

Drugie zastosowanie, przedstawione w rozdziale siódmym, ma mniejsze znaczenie praktyczne jednak świadczy dobitnie o tym, że opracowany model termo-filtracji pozwala na zrozumienie zjawisk i procesów zachodzących w naturze.

Uważam, że wybór zastosowań teorii rozwiniętej przez Doktoranta jest bardzo ciekawy, pozwala ocenić wartość poznawczą rozwijanej teorii oraz ilustruje możliwości jej zastosowań do badania ważnych problemów inżynierskich o dużym znaczeniu dla gospodarki.

W tym kontekście wybór tytułu pracy wydaje się trafny. Podmiotem jest tu główne osiągnięcie Doktoranta czyli model termo-filtracji, podkreślone jest również bardzo istotne jego zastosowanie praktyczne.

#### **4. Szczegółowa analiza treści rozprawy i jej ocena merytoryczna**

4.1. Rozdział pierwszy zawiera sformułowanie ogólne przedmiotu rozważań: ogólny opis procesu zgazowania węgla i oczekiwania związane z tym procesem, krótki opis ogólny zjawisk termo-filtracyjnych pozostających w związku z procesem podziemnego zgazowania węgla oraz koncepcję ogólną proponowanego w pracy podejścia teoretycznego. Koncepcję tę przedstawiono w kontekście istniejących modeli matematycznych, a właściwie dwóch rodzin takich modeli: opartych na teorii Biota odkształceń reologicznych ośrodka porowatego oraz budowanych z zastosowaniem formalizmu teorii homogenizacji. Autor w tej części pracy zarysowuje jedynie liczne możliwe rodzaje stosowanych uproszczeń i podkreśla znaczenie takich czynników jak dopływ wody i pary wodnej oraz konieczność kontrolowania tych procesów w praktyce podziemnego zgazowania. Autor opisuje przyjęte cele pracy, następnie opisuje zakres pracy oraz organizację rozprawy. W rozdziale tym Doktorant zapowiada opracowanie autorskiej wersji sformułowania teoretycznego oraz zbudowanie modelu numerycznego, który uwzględni rzeczywistą budowę geologiczną ośrodka w otoczeniu miejsca podziemnego zgazowania węgla.



Zapisanej explicite tezy pracy trudno doszukać się zarówno w tym rozdziale jak i w dalszej części rozprawy. Zamiast tego, w rozdziale pierwszym pracy sformułowano cel główny i cele dodatkowe. Główny cel pracy określono w sposób jednoznaczny następująco: stworzenie modelu matematycznego procesu termo-filtracji cieczy oraz gazów i w oparciu o ten model wykonanie obliczeń numerycznych przepływu cieczy i pary wodnej w gruntach otaczających generator zgazowania węgla brunatnego z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Cele dodatkowe rozprawy (cele pośrednie) to analiza sprzężonych zagadnień termicznych i zagadnień przepływów w ośrodku porowatym w świetle istniejących teorii, zbudowanie modelu odwodnienia dla uzyskania właściwych warunków prowadzenia procesu zgazowania, określenie parametrów efektywnych dla opracowanego modelu i ich obliczenie dla utworzonego modelu.

Formułowanie celu pracy zamiast tezy pracy jest ogólniejsze i bardziej naturalne we współczesnej nauce, zwłaszcza w dyscyplinach technicznych. Uczynieniu zadość formalnemu wymaganiu sformułowania tezy prowadzi czasem do karkołomnych figur stylistycznych. Dlatego brak wyraźnie zapisanej tezy pracy nie jest moim zdaniem brakiem formalnym, przeciwnie, treść rozprawy jest dzięki temu czytelniejsza.

Podsumowując rozdział pierwszy pracy należy stwierdzić, że zgodnie z tytułem, ma on charakter krótkiego wstępu formalnego.

4.2. W rozdziale drugim przedstawiono w sposób wyczerpujący opis procesu podziemnego zgazowania węgla.

Analizując oddziaływanie procesu zgazowania węgla na środowisko wymieniono zjawiska, które są dla środowiska szkodliwe lub uciążliwe, takie jak migracja produktów spalania węgla czy tworzenie się zapadłisk nad obszarami aktywności gazogeneratora. Jednocześnie, w powszechnej opinii proces zgazowania podziemnego postrzegany jest jako szansa dla przyszłości wykorzystania węgla jako paliwa w Polsce. Można prawdopodobnie próbować bilansować pozytywny i negatywny wpływ na środowisko stosując, na przykład, punkt widzenia gospodarki zrównoważonej. Autor przedstawia technologię zgazowania węgla jako proces, który może i powinien być starannie kontrolowany, widząc w tym szansę dla zastosowania rozwijanego w pracy modelu teoretycznego.

Kolejno, w rozdziale drugim, przedstawiane są podstawy teoretyczne opisu zjawiska przepływu cieczy przez ośrodek porowaty. Wymieniono ogólnie prawa przepływu w ośrodku porowatym. Określono założenia, jakie przyjmuje się klasycznie rozwiązując zagadnienia związane z hydrodynamiką wód podziemnych. W kolejnych podrozdziałach, zebrano założenia dotyczące zachowania się ośrodków i podano klasyczne, konstytutywne równania stanu dla fazy ciekłej i dla szkieletu porowatego. W kolejnym podrozdziale przedstawione jest równanie ciągłości przepływu. Klasyczny model matematyczny teorii filtracji przedstawiony jest zapisem równań operujących pojęciem wysokości hydraulicznej (naporu), pojemności sprężystej warstwy wodonośnej i gęstości cieczy.

Rozdział drugi kończy przegląd symulacji komputerowych procesów termicznych zachodzących w związku z działaniem gazogeneratora. Niestety, istniejące modele są bardzo uproszczone, zgadzam się z Autorem w stwierdzeniu, że sprowadzają się do symulacji procesów termicznych. Jednak nie pojawiła się w tym rozdziale wizja prawidłowego modelowania procesu zgazowania węgla, do którego trzeba zmierzać. Wydaje się, że w świetle możliwości numerycznych wielu ośrodków naukowych rozwijających modele zjawisk zachodzących w ośrodkach porowatych jedynie całkowite sprzężenie procesów opisanych modelami termo-hydro-chemo-mechanicznymi może prowadzić do realistycznego obrazu zjawisk wokół gazogeneratora. Uwaga ta jest uwagą krytyczną, gdyż w tym rozdziale recenzent spodziewał się opisu modeli ośrodków porowatych rozwijanych przez grupę profesora B. Schreflera z Uniwersytetu w Padwie, sprawdzonych na przykładach



modelowania pożarów w tunelu (prof. F. Pesavento i inni) lub modeli sprzężonych zjawisk termo-hydro-chemo-mechanicznych zachodzących w betonach w wysokiej temperaturze, traktowanych jako ośrodki porowate, opracowywanych i publikowanych przez zespół profesora D. Gawina z Łodzi. Poznanie tych modeli (mimo, że ich kontekst aplikacyjny jest inny) otworzy niewątpliwie nowe horyzonty przed Doktorantem, gdyż oferuje On własne, ważne osiągnięcie w zakresie modelu termo-hydro i w zakresie umiejętności budowania skomplikowanych modeli 3D, których to umiejętności tamte zespoły nie mają. Jednocześnie, wielką szansą dla realistycznego modelowania procesu zgazowania może się okazać sprzężenie procesów termo-hydro z procesami chemicznymi, mechanicznymi, ze zmianami faz i innymi, niezwykle ważnymi dla śledzenia ewolucji procesu zjawiskami.

4.3. W rozdziale trzecim przedstawione zostały modele matematyczne procesów filtracji i konsolidacji. Rozdział poprzedzony jest spisem oznaczeń. Spis ten dotyczy również rozważań zawartych w rozdziale czwartym, dlatego komentując ten element pracy odwołam się do zapisów, które pojawiają się w rozdziale czwartym, zakłócając w tym miejscu przyjęty układ recenzji. Niestety, spis ten jest dalece niekompletny. Na przykład znaczenie symbolu  $\theta$  (theta) nie jest nigdzie wyraźnie wyjaśnione. Czytelnik może domyślać się co oznacza ten symbol, niezwykle ważny dla rozważań, na podstawie jego funkcji w formułach. Pojawia się on (jak się wydaje) pierwszy raz w równaniu (4.62). Nie ma jednak pewności, że wskazane miejsce jest istotnie pierwszą definicją domyślną tego składnika temperatury (nie ulega wątpliwości jedynie, że w spisie oznaczeń ten symbol nie występuje). Kolejny przykład to użycie symbolu  $S$ . Według spisu oznaczeń jest to zewnętrzna powierzchnia elementu reprezentatywnego. Jednak już począwszy od wzoru (4.40) symbol ten oznacza entropię. W dalszym ciągu oznaczenie dla entropii zmienia się, jest to nadal  $S$ , ale zapisane innym krojem czcionki. Można łatwo odgadnąć intencję Autora i zrozumieć, że pomylił się we wzorze (4.40), jednak w rozprawie mamy kilka systemów założeń wyjściowych, rozwijane są różne warianty teorii, ośrodek ma dwa składniki. Wobec tego nigdy nie można być pewnym intencji Autora. Kontynuując analizę użycia tego oznaczenia należy zauważyć, że w dalszej części pracy pojawiają się oznaczenia  $s$  „małe” i  $S$  „duże”, tym razem znaczenie indeksów wyjaśnione jest przy pierwszym pojawieniu się tego symbolu (mimo istnienia spisu symboli). Przejście od wzorów (4.54) do zapisu (4.56) i dalszych sugeruje, że Autor przyjął nie zapisaną nigdzie explicite zasadę oznaczeń wielkości literami dużymi i małymi. Odgadywanie tych intencji nie jest łatwe. To jedynie przykłady licznych utrudnień, na jakie napotyka czytelnik pracy. Kolejna trudność to używane nazewnictwo. Z większości zapisów wynika, że Autor używa formalizmu uśredniania objętościowego. Jednocześnie, w wielu punktach pracy pojawia się pojęcie elementu reprezentatywnego, w innych zaś wspomina się o parametrach efektywnych (na przykład w linii nad wzorem (4.80)). Nigdzie nie jest wyraźnie wyjaśnione, o jakie parametry efektywne chodzi. Wydaje się, że wobec faktu, iż stosuje się teorię uśredniania objętościowego, właściwsze może być pojęcie objętości kontrolnej zamiast elementu reprezentatywnego. Uważam, że jest to konsekwencja faktu, że przejście ze skali mikro do skali makro nigdzie nie jest starannie zdefiniowane. Sens tensora naprężenia pozostaje do odgadnięcia. Trzeba przyjąć domyślnie, że obie fazy (lub trzy fazy) są obecne jednocześnie w każdym punkcie. Wynika to jedynie pośrednio z założeń zebranych na stronie 31. Jest to oczywiście podejście klasyczne, ale w kontekście braku rozróżnienia poziomów mikro i makro, istotne dla wyprowadzonych teorii rozważania o różnicach pomiędzy temperaturami płynu i szkieletu wynikających z różnych prędkości rozchodzenia się ciepła są dla mnie bardzo spekulatywne. Być może istnieje możliwość sformalizowania tych stwierdzeń, ale moim zdaniem należy je przedstawiać raczej jako element zbioru założeń nie wymagających uzasadnień. W ten sposób (na przykład) wzór (4.80) ma, moim zdaniem, charakter raczej założenia niż wynikania na poziomie mikrostruktury. Kontynuując dyskusję



tego fragmentu wyprowadzenia modelu termo-filtracji należy zauważyć, że prędkość rozchodzenia się ciepła w ośrodku to również sformułowanie niejasne wobec tego, że ani pojęcie czasu relaksacji ani dyfuzyjność cieplna nie pojawia się dotąd jawnie w rozważaniach, zaś ciecz przemieszcza się względem szkieletu.

Pewnym utrudnieniem w rozumieniu treści pracy jest określanie rozpatrywanego ośrodka mianem ośrodka dwufazowego. Rozumiem, że wynika to z faktu, że gaz i ciecz to stany skupienia materii opisywane przez mechanikę płynów, wobec tego traktuje się je jako jeden ośrodek, drugi to szkielet gruntowy. Jednak bardziej naturalnym i, jak się wydaje, powszechnym w geotechnice i mechanice gruntów jest termin „ośrodek trójfazowy”. Jestem przekonany, że wyróżnienie obu stanów skupienia płynów ma znaczenie fundamentalne dla teorii zjawisk zgazowania gdyż pozwala na wprowadzenie do modelu zjawisk związanych ze zmianą fazy, z rozpuszczaniem się gazów w cieczach i innych podobnych. Użycie terminu ośrodek dwufazowy sugeruje, że mamy do czynienia jedynie z dwoma różnymi stanami skupienia materii w ośrodku (szkielet i gaz lub szkielet i ciecz). Być może taka była intencja Doktoranta, nie jest to jasne dla piszącego tę opinię.

Kończąc rozważania dotyczące słabości systemu oznaczeń i nazewnictwa, dotyczące całej pracy, przechodzę do analizy merytorycznej przedstawionych rozważań teoretycznych.

Główną część rozdziału trzeciego zajmuje szczegółowa analiza modelu matematycznego konsolidacji Biota. Omówiono kolejno założenia wstępne, równania ciągłości przepływu dla szkieletu i płynu, równanie ciągłości przepływu wyspecyfikowane dla cieczy, równanie zachowania pędu dla fazy płynnej i kolejno dla fazy stałej oraz zapisano równania konstytutywne dla ciała Biota.

Kolejny model to model filtracji ściśliwego płynu przepływającego przez nieodkształcalny szkielet ośrodka dwufazowego. Rozdział kończy opis przepływu ściśliwego płynu przez odkształcalny szkielet ośrodka dwufazowego. Stwierdzam, że pomimo uwag krytycznych dotyczących notacji, wyprowadzenia wzorów końcowych zawarte w tym rozdziale uważam za prawidłowe. Również liczne uproszczenia, jakie wprowadzono do teorii uważam za uzasadnione zarówno teoretycznie jak i właściwe z pragmatycznego punktu widzenia.

4.4. W rozdziale czwartym uwaga Autora skupia się na wyprowadzeniu równań termo-filtracji. Omówiono kolejno założenia wstępne, równania ciągłości przepływu, równanie zachowania pędu, związki konstytutywne dla procesu nieizotermicznego, zastosowano pierwsze prawo termodynamiki i bilans entropii do wyprowadzenia równań analizowanego problemu. Przedstawione wyprowadzenia wzorów uważam za prawidłowe, są one zgodne z zasadami termodynamiki.

W ostatniej sekcji tego rozdziału zapisano wyprowadzone układy równań termo-filtracji. Zapisano je dla kilku wariantów teorii, uzyskanych przez kombinacje następujących założeń:

- szkielet jest ściśliwy lub nieściśliwy (jednak nawet w przypadku ściśliwości szkieletu, jego odkształcenia postaciowe są niemożliwe);
- Temperatury faz są różne lub wyrównane;
- Płyn jest słabo ściśliwą cieczą lub ściśliwym gazem

Te układy równań zawierają współczynniki materiałowe dobrze określone zarówno w przypadku indywidualnego traktowania fazy stałej i płynu jak i w przypadku wyrównanych temperatur.

Te układy równań są podstawowym rezultatem poznawczym pracy doktorskiej. W dalszej części pracy poddane zostaną analizie numerycznej i zastosowaniu w modelu numerycznym przepływów w sąsiedztwie gazogeneratora.



4.5. Rozdział piąty poświęcony jest analizie porównawczej modeli matematycznych filtracji. Dla wszystkich określonych powyżej przypadków zagadnienia filtracji, a także dla przypadku „klasycznego” opisanego funkcją wysokości hydraulicznej, rozwiązano osiowosymetryczne zadanie przepływu wody przez cylinder wypełniony piaskiem. To samo zadanie powtórzono dla zagadnienia przepływu powietrza. Kolejno, obliczenia powtórzono dla zagadnienia termo-filtracji. Dla zagadnienia termo-filtracji rozpatrzono dwa przypadki: kierunek przepływu ciepła i kierunek przepływu płynu są zgodne lub przeciwnie. Założono odpowiednie warunki brzegowe (opisano szczegółowo zadaną funkcję temperatury, dołączono skrypty, z których można odczytać szczegóły modelu numerycznego). Wybrano szereg wielkości, takich jak na przykład prędkość filtracji, dylatacja szkieletu lub wysokość hydrauliczna, dla których wykonano wykresy ilustrujące ich rozkład przestrzenny dla większości analizowanych wariantów. Nie ma możliwości relacjonować w tej opinii szczegółów tych porównań. Należy stwierdzić, że wybór obserwowanych wielkości pozwala wyrobić sobie opinię o wpływie poszczególnych założeń wyjściowych na wyniki symulacji. Oczywiście, nie ma tu porównania z rozwiązaniem dokładnym, Autor nie wartościuje modeli. Można jednak uznać wrażliwość modelu na przyjęte założenia i uproszczenia za zbadaną i dobrze zilustrowaną. Rozdział ten jest bardzo dobrze skonstruowany i bardzo ważny dla pracy.

4.6. W rozdziale szóstym przedstawiono praktyczną realizację obliczeniową wprowadzonych w poprzednich rozdziałach modeli matematycznych. Opracowaną teorię termo-filtracji zastosowano do obliczenia przepływu wód podziemnych w otoczeniu gazogeneratora. Istotnym elementem modelu jest wstępne obniżenie ciśnienia hydrostatycznego w złożu przez zastosowanie pompowań i wytworzenie leja depresji. Obliczenia wykonane zostały przy pomocy programu FlexPDE, metodą elementów skończonych. Ważnym elementem obliczeń jest budowa realistycznego modelu otoczenia geologicznego gazogeneratora. Autor wykorzystuje dane z wierceń, interpretuje prawidłowo i kompetentnie warunki hydrogeologiczne w otoczeniu pokładów węglowych. Model przestrzenny zbudowany został w oparciu o zaproponowaną idealizację układu warstw. Budowa tego modelu wymagała wykorzystania szeregu narzędzi numerycznych oraz właściwych kompetencji Autora. Ilustracja rozwoju leja depresyjnego w pierwszej części rozdziału, wykresy ilustrujące ewolucję temperatury, pola wektorowe strumienia ciepła i wektora prędkości filtracji pozwalają jakościowo ocenić rozwój procesu termo-filtracji. Rysunki są jakościowo przekonujące. Jednak opis modelowania pozostawia miejsce na wiele pytań. Nie jest jasne, który z modeli został zastosowany, nie jest jasne w jaki sposób modelowano przejścia fazowe. Dotąd rozpatrywano zawsze ośrodek dwufazowy i pory wypełniała bądź ciecz bądź powietrze. Z analizy znanych mi rozwiązań wiem, że moment przejścia fazowego jest szczególnie trudny do prawidłowego ujęcia teoretycznego i numerycznego. Nie jest jasne jak otrzymano mapy obszarów zajętych przez parę wodną. Autor wspomina, że dla utrzymania dokładności rozwiązania stosowano zmianę siatki. Chciałbym wiedzieć w jakich obszarach modelu było to konieczne. Interesujące jest również, jaki algorytm został wybrany do rozwiązania problemu niestacjonarnego. Autor wspomina (str 128), że uzyskano dane dotyczące ewolucji parametrów materiałowych w funkcji temperatury. Czy dane te zostały wykorzystane w rozwiązaniu, jaki algorytm został zastosowany do rozwiązania tego nieliniowego zagadnienia?

4.7. W rozdziale siódmym przedstawiono zastosowanie modelu teoretycznego termo-filtracji do analizy jakościowej zjawiska ruchomych piasków na terenach pustynnych. Autor stawia hipotezę wyjaśniającą występowanie zjawiska ruchomych piasków w obszarach suchych a więc w warunkach, w których nie ma zastosowania dotychczasowa teoria, wiążąca



to zjawisko z przepływami wody przez grunt. W rozdziale wykazano, stosując model termo-filtracji, że ruch powietrza wywołany gradientem temperatur może prowadzić do znacznych prędkości przepływu. Rozdział ten jest ciekawy, dowodzi kreatywności Doktoranta.

4.8. Ostatni rozdział jest podsumowaniem pracy, zawiera wnioski, które z niej wynikają. Pierwsza część tego rozdziału to podsumowanie pracy. Autor syntetycznie omawia opracowane modele teoretyczne, wymienia ich różnice w stosunku do modelu klasycznego i podkreśla zalety opracowanych w rozprawie modeli. Większość stwierdzeń wypunktowanych na stronie 151 odpowiada właściwościom wyprowadzonego modelu. Jednak trzy ostatnie stwierdzenia a także zdanie zamieszczone bezpośrednio pod wypunktowanym tekstem na stronie 152 są sformułowane bardzo radykalnie, ich uzasadnienie nie jest dla mnie jasne. Są to pewne przybliżenia, które nigdy nie są interpretowane jako rozwiązania dokładne, związek konstytutywny zaś lepiej obserwować doświadczalnie niż postulować teoretycznie (mimo pozornie takiej właśnie praktyki np. w teorii nieliniowej sprężystości). Aby uznać związek taki za niepoprawny trzeba wykazać, że jest sprzeczny z postulatami jakie stawia się związkowi konstytutywnym, w tym postulatowi termodynamicznej dopuszczalności.

Wnioski z doświadczeń numerycznych i z modelu procesu zgazowania węgla, wymienione na kolejnych stronach podsumowania, nie wymagają dyskusji, można się z nimi zgodzić.

## 5. Uwagi szczegółowe, edytorskie i inne.

W trakcie merytorycznej analizy kolejnych rozdziałów przedstawiłem kilka uwag, które są, moim zdaniem, najważniejsze, łatwo znaleźć je w tekście opinii, nie zostaną więc powtórzone w tym punkcie. Również pytania, które padły w punkcie 4.6 mają charakter uwag merytorycznych. Uważam, że takie informacje powinny pojawić się w opisie procedur numerycznych.

Stwierdzam, że praca jest prawidłowo skomponowana, błędy edytorskie i stylistyczne są nieliczne, nie wymagają dalszego wymieniania w recenzji. Strona graficzna pracy jest opracowana estetycznie i czytelnie. Rysunki są czytelne i dobrze ilustrują wyniki pracy.

## 6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Oryginalnym osiągnięciem naukowym mgr inż. Michała Strzeleckiego jest rozwinięcie i praktyczne przetestowanie autorskiej teorii filtracji i termo filtracji w praktycznych problemach inżynierskim dotyczących modelowania przebiegu procesu zgazowania węgla i analizy zjawiska ruchomych piasków.

Zgadzam się z większością stwierdzeń sformułowanych przez doktoranta w treści rozprawy. Uważam, że świadczą one o jego dużej dojrzałości naukowej i umiejętności dokonania krytycznej i porównawczej analizy teorii naukowych, w tym tych, które tworzy. Jest to warunek rozwoju opracowanego modelu, stanowi też bardzo istotny przyczynek do praktyki modelowania teoretycznego i numerycznego sprzężonych problemów cieplnych i związanych z ruchem płynów w ośrodkach porowatych.


Uwagi krytyczne i wątpliwości, jakie sformułowałem powyżej, nie obniżają wartości pracy, przeciwnie, dowodzą, że praca jest interesująca i może być źródłem dyskusji naukowej.

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dokonane przez Doktoranta, a także wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez jej Autora.

Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej „górnictwo i geologia inżynierska”. Autor wykazał się dobrą znajomością najważniejszych prac naukowych i inżynierskich związanych z tematem rozprawy doktorskiej, ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu objętego tematem rozprawy oraz ogólną wiedzą teoretyczną związaną z wymienioną wyżej dyscypliną naukową.

Praca wyróżnia się całościowym ujęciem tematu, dojrzałością syntetycznych przeglądów stanu wiedzy w dziedzinie modelowania procesów termicznych i filtracyjnych przy pomocy analizy teoretycznej i technik modelowania numerycznego, dojrzałością krytycznej i porównawczej analizy otrzymanych wyników oraz bardzo ciekawymi zastosowaniami praktycznymi zaproponowanej teorii.

W związku z tym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Michała Strzeleckiego spełnia wymagania „ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” oraz wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.



Marek Lefik

dr hab. inż. prof. nadzwyczajny PŁ