Opole, 16.04.2018

dr hab. inż. Krzysztof Bartecki
prof. Politechniki Opolskiej

Instytut Automatyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Pawła Zarodkiewicza
pt. *Modelowanie nieustalonego przepływu gazu o zmiennym składzie w rurociągu*

1. Tematyka, cel i zakres rozprawy

Gaz ziemny jest nośnikiem energii coraz częściej wykorzystywanym zarówno w energetyce zawodowej jak i przemysłowej, a także m.in. w rolnictwie, transporcie oraz gospodarce komunalnej. Jego wydobycie, przesył oraz użytkowanie odgrywają we współczesnym świecie istotną rolę, zarówno w sensie ekonomicznym, jak i politycznym. Jednocześnie coraz większego znaczenia nabierają alternatywne, odnawialne, gazowe źródła energii, takie jak np. biogaz czy wodór. Rozwój nowych źródeł gazu oraz wykorzystanie istniejących sieci gazowych do nowych celów, takich jak np. magazynowanie energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, wymagają usprawnienia istniejących oraz opracowania nowych metod kontroli jakości gazu. Obecnie istnieją różne metody tej kontroli – począwszy od najdokładniejszego, ale najdroższego w realizacji sposobu polegającego na wyposażeniu każdego punktu wyjścia systemu przesyłowego w chromatografy, poprzez umieszczenie chromatografów jedynie w pewnych charakterystycznych punktach systemu, aż po wykorzystanie specjalistycznych pakietów oprogramowania, umożliwiających kompleksową symulację działania sieci przesyłowych. W przypadku tej ostatniej metody wyniki pomiarów kaloryczności gazu przy pomocy chromatografów umieszczonych w każdym ze źródeł stanowią warunki brzegowe, umożliwiające rozwiązanie, w oparciu o odpowiedni model matematyczny, zagadnienia nieustalonego przepływu gazu.

Tematyka przedstawionej rozprawy doktorskiej odnosi się do trzeciej z wyżej wymienionych metod kontroli jakości gazu i w głównej mierze dotyczy sformułowania modelu matematycznego nieustalonego przepływu gazu w gazociągu, zakładającego możliwość zadawania jego obciążenia w jednostkach strumienia energii. Model ten, zgodnie z założeniami Autora, w przyszłości umożliwi

śledzenie zmian jakości gazu przepływającego w systemie oraz podejmowanie przez jego operatora odpowiednich działań. Celem rozprawy jest wykazanie, że modelowanie przepływu gazu na potrzeby transportu rurociągowego w jednostkach strumienia energii ma istotne zalety, w porównaniu z powszechnie dotychczas stosowanymi modelami przepływu opartymi na strumieniu objętości bądź strumieniu masy. Zakres rozprawy obejmuje dwa główne zadania badawcze. Pierwsze z nich polega na sformułowaniu modelu przepływu gazu w jednostkach energii, a także na symulacji nieustalonego przepływu gazu o zmiennym składzie w gazociągu przesyłowym wysokiego ciśnienia. Badania te dotyczą jednowymiarowego, nieustalonego, nieizotermicznego przepływu gazu przez gazociąg i obejmują zarówno procesy przepływowe, jak i cieplne. Drugie zadanie badawcze stanowi studium przypadku, polegające na symulacji procesów przepływowych zachodzących w gazociągu przy hipotetycznym zatłaczaniu wodoru na potrzeby magazynowania energii w systemie oraz analizę scenariuszy prowadzenia ruchu systemu.

Tematykę badań podjętych w ramach pracy oceniam jako aktualną i potrzebną, zarówno ze względu na jej walor badawczo-naukowy, wynikający z opracowania oraz zastosowania przez Autora zaawansowanych modeli matematycznych umożliwiających komputerową symulację gazowych sieci przesyłowych, jak i mając na uwadze ekonomiczny aspekt pracy, szczególnie istotny w kontekście aktualnej sytuacji gospodarczej i geopolitycznej Polski.

2. Struktura i zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 112 stron w formacie C5, zawiera 33 rysunki, 4 tabele oraz 2 załączniki. Podzielona jest na 7 rozdziałów, poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem stosowanych w niej oznaczeń oraz spisem treści. W rozdziale pierwszym Autor nakreślił tło rozprawy, przybliżając jej czytelnikom problematykę rynku gazu w Polsce i w wybranych krajach europejskich, a także zagadnienia związane z prowadzeniem ruchu oraz jakością gazu w sieciach przesyłowych. W rozdziale drugim uzasadniono podjęcie tematu pracy, w pierwszej kolejności omawiając prawne aspekty dotyczące jakości gazu, a następnie formułując cel oraz tezę pracy. W rozdziale trzecim przeprowadzono obszerny przegląd literatury dotyczącej modelowania nieustalonego przepływu gazu w gazociągach, a także procesów śledzenia zmian jakości gazu oraz magazynowania energii ze źródeł odnawialnych. W rozdziale tym dokonano również usytuowania tematu pracy w rozpatrywanym obszarze, akcentując nowatorskie elementy proponowanego rozwiązania. Rozdział czwarty poświęcono zagadnieniom matematycznego modelowania procesów przepływowych zachodzących w rurociągach, przy czym przedstawiono w nim zarówno model przepływu gazu wyrażony w jednostkach objętości, jak i autorski model sformułowany w jednostkach energii. W rozdziale piątym dokonano przeglądu istniejących numerycznych metod rozwiązywania

zagadnień mechaniki płynów, w szczególności pod kątem możliwości ich zastosowań w problemach związanych z nieustalonym przepływem gazu w rurociągu. Rozdział szósty zawiera weryfikację oraz walidację rozważanego modelu przepływowego z wykorzystaniem danych rzeczywistych. Zaprezentowano tutaj również wyniki badań symulacyjnych dotyczących nieustalonego przepływu gazu w rurociągu w warunkach zatłaczania wodoru. Rozdział siódmy ma charakter podsumowujący i zawiera wynikające z pracy wnioski, a także omówienie potencjalnych kierunków dalszych badań. Dwa załączniki do pracy stanowią uzupełnienie rozdziału czwartego i zawierają wyprowadzenia matematycznych formuł opisujących przepływ gazu w rurociągu, wyrażony odpowiednio w jednostkach objętości oraz energii.

Wykaz bibliografii liczy 86 pozycji, w większości trafnie dobranych i odpowiednio cytowanych w treści rozprawy. Większość z nich to artykuły i opracowania w języku angielskim; są tu także publikacje w języku polskim oraz pojedyncze pozycje w języku niemieckim. Na podkreślenie zasługuje fakt, że aż 24 z nich to publikacje z ostatnich trzech lat. Co prawda dorobek publikacyjny autora obejmuje tylko 3 pozycje (wszystkie współautorskie z promotorem rozprawy), jednak jest wśród nich zasługujący na szczególną uwagę artykuł pt. *Simulation of natural gas quality distribution for pipelines*, opublikowany w 2017 roku w prestiżowym czasopiśmie *Energy*. Ponadto na stronie internetowej innego renomowanego czasopisma *Journal of Natural Gas Science and Engineering* można znaleźć zaakceptowany w marcu br. do druku artykuł pt. *Gas composition tracking in transient pipeline flow*, którego jednym z współautorów jest Autor recenzowanej rozprawy.

Podsumowując strukturę pracy, należy stwierdzić, że jest ona dobrze przemyślana i właściwie zredagowana. Czyta się ją dobrze – proporcje między jej częścią opisową i częścią zawierającą formuły matematyczne są odpowiednio wyważone. Ilustracje oraz wykresy są (w większości) czytelne i umieszczone we właściwych miejscach, co ułatwia czytelnikowi zrozumienie treści pracy oraz analizę otrzymanych wyników badań symulacyjnych i weryfikacyjnych.

3. Oryginalne wyniki rozprawy

Autor rozprawy postawione przed sobą cele zrealizował w sposób kompleksowy, w umiejętny sposób łącząc zdolność wyszukiwania i formułowania złożonych problemów badawczych oraz umiejętność wykorzystania zaawansowanego aparatu matematycznego oraz narzędzi komputerowych do ich rozwiązywania. Do najważniejszych oryginalnych osiągnieć pracy należą:

- Dokonanie obszernego i aktualnego przeglądu literatury dotyczącej problematyki matematycznego modelowania zjawisk zachodzących w gazociągach, numerycznego

rozwiązywania problemów przepływowych, a także problematyki pozyskiwania gazu ze źródeł odnawialnych, metod jego transportu i użytkowania w mieszaninie z gazem ziemnym.

- Sformułowanie i numeryczne rozwiązanie modelu jednowymiarowego, nieizotermicznego, nieustalonego przepływu gazu w rurociągu, umożliwiającego śledzenie jakości gazu.
- Opracowanie alternatywnego modelu przepływowego, w którym strumień gazu płynącego przez gazociąg został zastąpiony strumieniem energii chemicznej gazu. Na uwagę zasługuje fakt, że model ten opisuje nieustalony przepływ nieizotermiczny.
- Walidację opracowanego modelu przepływowego z wykorzystaniem danych rzeczywistych, uzyskanych w trakcie pracy gazociągu należącego do krajowego systemu przesyłowego. Wyniki walidacji w pełni potwierdzają poprawność zaproponowanego przez Autora rozwiązania.

W kontekście istniejących metod kontroli jakości gazu w systemach przesyłowych, powyższe wyniki rozprawy można podsumować konkluzją, że opracowany przez Autora model przepływu gazu mógłby zostać w przyszłości wykorzystany do budowy komputerowego systemu doradczego, wspomagającego pracę operatora systemu przesyłowego. Dzięki wynikom symulacji operator miałby czas na podjęcie odpowiednich działań, mających na celu zapewnienie wymaganych parametrów gazu u jego odbiorców.

4. Uwagi i komentarze

4.1. Uwagi merytoryczne

W pracy nie znalazłem istotnych błędów merytorycznych. Mam jednak kilka uwag o charakterze krytyczno-dyskusyjnym:

a) W pracy Autor skupia się na rozwiązaniu problemu nieustalonego przepływu gazu w rurociągu przy użyciu różnych metod numerycznych, w kwestii rozwiązań analitycznych ograniczając się do stwierdzenia, że są one niedostępne ze względu na złożoną postać odpowiednich równań różniczkowych cząstkowych. Tymczasem dla niektórych bardzo prostych przypadków takie rozwiązania istnieją; nawet Autor sam się na te analityczne rozwiązania powołuje – przykładem jest tu liniowe równanie adwekcji, którego rozwiązanie przedstawiono w formie wykresu na rys. 11. Wskazane byłoby podanie tego rozwiązania również w postaci analitycznej (zamkniętej) oraz jego krótkie omówienie.

b) Bardzo ważnym zagadnieniem z punktu widzenia istnienia oraz właściwości rozwiązań wielu problemów fizyki matematycznej, w szczególności zaś problemów opisanych równaniami różniczkowymi cząstkowymi, jest zagadnienie tzw. dobrego postawienia zadania (w sensie

Hadamarda). W rozdziale 4. Autor wyprowadza matematyczny model przepływu gazu w rurociągu w formie równań różniczkowych cząstkowych, dobrze wyjaśniając od strony fizykalnej pochodzenie tych równań w oparciu o prawa zachowania masy, pędu oraz energii. Jednak mając na uwadze kompletność omawianego modelu ciągłego oraz wspomnianą wyżej poprawność postawienia zadania, jego opis w formie samych tylko równań cząstkowych nie jest wystarczający. W celu uzupełnienia tego opisu wymagane byłoby również podanie:

- dziedzin dla zmiennych niezależnych x oraz t (obszaru rozwiązania),
- wartości przyjmowanych przez zmienne zależne, reprezentujące wartości ciśnień, strumieni, gęstości i temperatur,
- warunków początkowych reprezentujących rozkłady powyższych wielkości fizycznych wzdłuż osi rurociągu dla chwili t=0.

Dodatkowo, ze względu na fakt, że rozpatrywane są tu problemy, dla których dziedzina zmiennej geometrycznej x jest ograniczona, wymagane jest podanie odpowiednich warunków brzegowych. Co prawda zarówno obszar rozwiązania, jak i warunki graniczne zostały w pracy podane, ale dopiero w rozdziale 6. zawierającym prezentację rozwiązania odpowiedniego zadania numerycznego.

c) Przedstawiona w rozdziale 4. różniczkowa postać równań opisujących prawa zachowania implikuje stosunkowo restrykcyjne wymagania co do klasy funkcji stanowiących ich rozwiązania – wszystkie one powinny być przynajmniej jednokrotnie różniczkowalne w sposób ciągły. Jednak Autor nie poczynił tutaj żadnych założeń odnośnie właściwości tych rozwiązań – w szczególności nie określił, czy dopuszcza także istnienie rozwiązań nieciągłych. Nieciągłości w rozwiązaniach rozważanej klasy równań opisujących prawa zachowania mogą wynikać np. z nieciągłości warunków początkowych (dla równań liniowych) lub z nieliniowości tych równań (nawet przy założeniu ciągłych warunków początkowych). Klasycznym przykładem drugiego z wymienionych przypadków jest nielepkie równanie Burgersa i jego słabe (uogólnione) rozwiązanie opisujące powstawanie tzw. fal uderzeniowych. W tym kontekście wskazane byłoby krótkie omówienie postaci całkowej praw zachowania oraz związanego z nią pojęcia słabego (uogólnionego) rozwiązania równania różniczkowego cząstkowego.

d) W rozdziale 5. omawiane są ogólne właściwości wykorzystanych w pracy metod różnic skończonych, przy czym dokonano ich podziału na metody jawne (rozdział 5.1) oraz niejawne (rozdział 5.2). Jednak we wprowadzeniu do rozdziału 5. brakuje omówienia ogólnej specyfiki tych dwóch grup metod – np. krótkiego wyjaśnienia, na czym polega „jawność" lub „niejawność" poszczególnych schematów numerycznych.

4.2. Uwagi redakcyjne

W pracy znaleźć można kilkanaście drobnych usterek redakcyjnych, przy czym część z nich dotyczy struktury pracy, w tym tytułów rozdziałów, a także równań i ich numeracji, natomiast pozostałe usterki to błędy literowe oraz interpunkcyjne. Poniżej wymieniono niektóre z nich:

- Piąty oraz szósty rozdział pracy zatytułowano odpowiednio: *Numeryczne rozwiązanie problemu* oraz *Rozwiązanie problemu i omówienie wyników*. Tytuły te brzmią podobnie i bez zapoznania się z rzeczywistą treścią tych rozdziałów trudno zorientować się, czym się one różnią. W rzeczywistości, w rozdziale piątym nie podano numerycznego rozwiązania problemu (jak sugerowałby jego tytuł), lecz raczej dokonano przeglądu numerycznych metod rozwiązywania zagadnień mechaniki płynów. Zatem bardziej trafny byłby, na przykład, następujący tytuł tego rozdziału: *Przegląd numerycznych metod rozwiązywania problemów przepływowych*. Natomiast tytuł rozdziału szóstego dobrze odpowiada jego treści.
- Tytuł rozdziału 3.3 jest nieco zbyt długi, moim zdaniem wystarczyłoby ograniczyć się do jego pierwszej części: *Dodatkowe źródła gazu w systemie przesyłowym*. Fakt, że chodzi tu również o źródła alternatywne, takie jak biometan czy wodór, został już odpowiednio zaakcentowany w treści rozdziału.
- Należy mieć na uwadze, że omawiane w rozdziałach 4.1 oraz 4.4 pojęcie „równań stanu" może być różnie rozumiane przez specjalistów z różnych dziedzin. Co innego pojęcie to będzie oznaczało w termodynamice, a co innego np. w dziedzinie matematycznego modelowania układów dynamicznych. Uwagi tej nie należy traktować w kategorii błędu czy usterki lingwistycznej, lecz jedynie jako wskazanie na możliwość wystąpienia ewentualnych nieporozumień.
- Część opisu odnoszącego się do równań stanu została w pracy powtórzona – np. równania (4.5) oraz (4.21) są identyczne; to samo dotyczy równań (4.6) i (4.25).
- Na str. 56 Autor po raz pierwszy w pracy wspomina o warunku zbieżności Couranta-Friedrichsa-Lewy'ego. Celowe byłoby wprowadzenie tutaj akronimu CFL – tym bardziej, że w dalszej części pracy (np. na str. 58) akronim ten pojawia się bez wcześniejszego rozwinięcia.
- Na str. 70 (linia 2 od góry) pojawia się błędne odwołanie do równań (4.41)-(4.45). Tymczasem ostatnim równaniem w rozdziale 4. jest równanie o numerze (4.42).
- Brak interpunkcji w odniesieniu do elementów list wypunktowanych (np. na str. 12 oraz na str. 13).

- Na listach wypunktowanych znajdujących się na str. 12 oraz na str. 13 po nazwach miejscowości zamiast znaku łącznika (dywizu) powinien być znak półpauzy (dłuższa pozioma kreska).
- Słabo czytelne opisy (legendy) na rysunkach (np. na rys. 1 oraz na rys. 8).
- Brak opisów (legend) na niektórych rysunkach. Na przykład na rys. 3 i rys. 4 nie wyjaśniono znaczenia żółtych oraz fioletowych symboli.
- Zastosowanie na wykresach linii w żółtym kolorze sprawia, że są one słabo czytelne (np. wykresy na rys. 22 oraz rys. 26).
- Na str. 20 (linia 16 od góry) zamiast: „siei" powinno być: „sieci".
- Na str. 25 (linia 3 od góry) zamiast: „system" powinno być: „systemem".
- Na str. 28 (linia 1 od dołu) zamiast: „na rysunku 9" powinno być: „na rysunku 8".
- Na str. 44 (linia 6 od dołu) zamiast: „zdefiniowane" powinno być: „zdefiniowana".
- Str. 47 (linia 4 od góry): brakujący przecinek przed wyrazem „którego".
- Na str. 51 (linia 4 od góry) powinno być: „gdzie T_c oznacza temperaturę krytyczną, a p_c ciśnienie krytyczne."

Wymienione uwagi redakcyjne nie mają istotnego znaczenia dla ogólnej oceny recenzowanej pracy.

5. Wnioski końcowe

Na podstawie lektury przedstawionej rozprawy można stwierdzić, że jej Autor dobrze orientuje się zarówno w praktycznych zagadnieniach związanych z transportem paliw gazowych przy użyciu systemów przesyłowych, jak i w problematyce ich matematycznego i komputerowego modelowania. W szczególności odnosi się to do umiejętności wykorzystania numerycznych metod obliczeniowych w rozwiązywaniu równań różniczkowych cząstkowych opisujących wybrane zagadnienia z dziedziny mechaniki płynów. Zaproponowana metoda polegająca na sformułowaniu modelu przepływu gazu w jednostkach energii oraz symulacji nieustalonego, nieizotermicznego przepływu gazu została zweryfikowana w sposób doświadczalny. Zadanie badawcze zostało przez Doktoranta w jasny sposób sformułowane w celu oraz tezie pracy, a następnie umiejętnie zrealizowane oraz udokumentowane w formie recenzowanej rozprawy.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Pawła Zarodkiewicza pt. *Modelowanie nieustalonego przepływu gazu o zmiennym składzie w rurociągu* spełnia wszystkie wymagania stosownej ustawy o tytułach i stopniach naukowych i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

Bartecki