Poznań, 12 lutego 2018

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA I INŻYNIERII ŚRODOWISKA
Instytut Inżynierii Środowiska
ul. Berdychowo 4, 60-965 Poznań

Prof. dr hab. inż. Janusz Wojtkowiak
tel. (61) 6652442
e-mail: janusz.wojtkowiak@put.poznan.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała KUBRAKA

pt.: „Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem"

Recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Wydziału Instalacji Budowlanych Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej w związku z uchwałą nr 67/2017 z dnia 21 listopada 2017 roku, przekazaną w piśmie Dziekana WIBHiIŚ PW prof. nzw. dr hab. inż. Krzysztofa Wojdygi – (pismo nr WIBHiIŚ-9/2018 z dnia 15.01.2018).

1. Ogólna charakterystyka pracy

Oceniana praca została wydana drukiem w roku 2017 jako publikacja Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Praca liczy 183 strony i składa się z 4 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz spisem oznaczeń. Rozprawę zamyka spis literatury i załącznik zawierający tytuły rysunków oraz wykresy z wynikami obliczeń i pomiarów. Spis literatury obejmuje 66 pozycji, wśród których Doktorant jest współautorem 2 prac – jednego artykułu w polskim czasopiśmie naukowo-technicznym (Instal, 2013) i jednego referatu opublikowanego (wygłoszonego) w ramach Międzynarodowej Szkoły Hydrauliki (*36 International School of Hydraulics, 2017*). Obie prace są ściśle związane z tematyką ocenianej rozprawy doktorskiej.

W spisie literatury liczną grupę stanowią artykuły opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych, takich jak: *Journal of Hydraulic Engineering, Journal of Hydraulic Research, Journal of Water Resources Planning and Management, Journal*

of Fluids Engineering – ASME Transactions, International Journal of Numerical Methods in Fluids, Journal of Fluid Mechanics.

Oceniana praca doktorska ma charakter teoretyczno-doświadczalny i mieści się w dyscyplinie „inżynieria środowiska".

2. Ocena tematyki pracy

Rozprawa doktorska dotyczy problemu wpływu obecności przewodu telekomunikacyjnego (światłowodu) w rurociągu wodociągowym na jego charakterystykę przepływową. Zakres rozprawy obejmuje przepływy w warunkach ustalonych i nieustalonych.

Pomysł wykorzystania sieci wodociągowej do prowadzenia przewodów światłowodowych jest nowatorski i warty rozpatrzenia. Jego zastosowanie daje szanse uzyskania znaczących korzyści, tak na etapie realizacji inwestycji (np. ograniczenie robót ziemnych), jak i podczas eksploatacji (np. obniżenie ryzyka zniszczenia światłowodu w czasie pożaru). To, w jakim zakresie pomysł znajdzie praktyczne zastosowanie będzie zależało od rozwiązania wielu kwestii szczegółowych. Jedną z takich kwestii jest wpływ obecności przewodu telekomunikacyjnego na straty ciśnienia wody w przepływie ustalonym. Drugą jest wpływ światłowodu na przebieg uderzenia hydraulicznego w rurociągu. Można przyjąć, że znaczący wzrost strat ciśnienia lub zwiększenie prędkości fali ciśnienia w uderzeniu hydraulicznym, spowodowane obecnością światłowodu, byłyby dyskwalifikujące dla takiego rozwiązania. Autor rozprawy podjął się zbadania i rozstrzygnięcia obydwu powyższych kwestii.

W dostępnej w literaturze n/t przepływów ciśnieniowych znaleźć można liczne informacje o wpływie różnych „blokad" na straty ciśnienia w przepływach ustalonych. Brakuje natomiast danych o wpływie obecności przewodu elastycznego wewnątrz rurociągu na przebieg uderzenia hydraulicznego.

Biorąc powyższe pod uwagę należy stwierdzić, że tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Michała Kubraka jest ważna i aktualna, tak z poznawczego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

3. Ogólna ocena treści pracy

W rozdziale 1. Autor krótko uzasadnia celowość podjęcia tematu. Formułuje tezę, cel i zakres pracy. W sposób syntetyczny omawia stan wiedzy w zakresie ustalonego i nieustalonego ruchu wody w przewodach ciśnieniowych. Zakres pracy obejmuje rurociągi prostoliniowe, stalowe z wodą o stałej temperaturze płynącą z prędkościami spotykanymi w sieciach wodociągowych. Kandydat analizuje cztery przewody światłowodowe o różnych

średnicach i jeden grubościenny przewód silikonowy. Badania prowadzi metodami analitycznymi, numerycznymi i eksperymentalnymi. Teza pracy w brzmieniu: „*Przewód umieszczony wewnątrz stalowego rurociągu w obszarze ciśnieniowego przepływu wody powoduje niewielki wzrost liniowych strat ciśnienia w ruchu ustalonym oraz ma tłumiące oddziaływanie na przyrosty ciśnienia wody i skraca czas trwania dodatniego uderzenia hydraulicznego*", nie budzi zastrzeżeń.

Cel, zakres i teza pracy zostały określone jasno i precyzyjnie. Wykazanie prawdziwości postawionej tezy stanowi właściwe wyzwanie dla pracy doktorskiej.

Rozdział 2. Dotyczy ustalonego ciśnieniowego przepływu wody w prostoliniowym rurociągu. Na wstępie Kandydat podaje podstawy teoretyczne opisu strat ciśnienia (wysokości strat energii) w rurociągu bez oraz z umieszczonym wewnątrz światłowodem. Przeprowadza obliczenia, z których wynika, że decydujący wpływ na straty ciśnienia ma względna średnica zewnętrzna przewodu odniesiona do średnicy wewnętrznej rurociągu (D_2/D_1). Pokazuje, że wpływ chropowatości powierzchni przewodu na straty ciśnienia jest niewielki.

Numeryczną analizę przepływu wykonuje za pomocą kodu CFD Fluent. Wyznacza pole prędkości wody w przekroju poprzecznym rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem, które charakteryzuje się nieznacznym zmniejszeniem obszaru maksymalnej prędkości wody, w porównaniu z polem w rurociągu bez przewodu. Jest to wynik zgodny z oczekiwaniem mający jasną interpretację fizyczną.

Celem badań doświadczalnych jest walidacja teoretycznych zależności opisujących analizowany przepływ. Kandydat przeprowadza badania na stanowisku z rurociągiem stalowym o długości $L = 48$ m i średnicy wewnętrznej $D_1 = 0{,}0531$ m. Wyniki pomiarów strat ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem potwierdzają zadowalającą dokładność opisu teoretycznego.

Analizy teoretyczne i numeryczne oraz badania doświadczalne opisane w Rozdziale 2 są w pełni poprawne (mimo drobnych zastrzeżeń wymienionych w punkcie 4 niniejszej recenzji) **i zasługują na wysoką ocenę.**

W Rozdziale 3. Kandydat analizuje nieustalony przepływ wody w przewodzie wodociągowym podczas uderzenia hydraulicznego. Podobnie jak w Rozdziale 2 stosuje metody analityczne, numeryczne i eksperymentalne. Wyprowadza trzy zależności na prędkość fali ciśnienia w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, grubościennym i cienkościennym przewodem.

Przeprowadza badania doświadczalne, które potwierdzają, że umieszczenie przewodu w rurociągu skraca czas trwania uderzenia hydraulicznego i obniża maksymalne wartości

skoków ciśnienia wywołane uderzeniem hydraulicznym. Wykazuje, że redukcja skoku ciśnienia jest tym większa im większa jest odkształcalność przewodu wprowadzonego do rurociągu.

Do analizy numerycznej zjawiska uderzenia hydraulicznego Autor wykorzystuje zapożyczony (niekomercyjny) kod komputerowy, bazujący na zmodyfikowanej metodzie elementów skończonych (MES). Wyniki obliczeń numerycznych stosuje do wyznaczenia wartości współczynników korygujących prędkości fali ciśnienia, pozwalających na uzyskanie dobrej zgodności wyników obliczeń i pomiarów.

Zawartość Rozdziału 3 nie budzi większych zastrzeżeń i zasługuje na uznanie. Pewne wątpliwości co do sposobu prezentacji wyników, zamieszczono w rozdziale 4 niniejszej recenzji.

Rozdział 4. ocenianej pracy zawiera wnioski i podsumowanie. Autor, obok sprawy zasadniczej, jaką jest wykazanie poprawności postawionej tezy, formułuje szereg wniosków o dużym praktycznym znaczeniu.

Zbadanie wpływu umieszczenia przewodu elastycznego wewnątrz rurociągu na parametry hydrauliczne ciśnieniowego przepływu wody w warunkach ustalonych i nieustalonych z wykorzystaniem metod analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych, analiza wyników oraz wyciągnięte wnioski, stanowią o dużej wartości merytorycznej i aplikacyjnej ocenianej pracy.

Cel rozprawy został osiągnięty, teza udowodniona, a otrzymane wyniki mogą być uznane za rozwiązanie ważnego problemu naukowego.

4. Uwagi krytyczne

4.1. Uwagi formalne

Język i układ rozprawy są zwięzłe i poprawne. Sposób prezentacji wyników jest właściwy pod względem edytorskim. Wszystkie rysunki, fotografie i tabele są starannie wykonane i dobrze dobrane. Kilka zastrzeżeń natury merytorycznej, dotyczących prezentacji wyników, podano w pkt. 4.2 niniejszej recenzji. Mimo dużej staranności, Autor nie ustrzegł się usterek edytorskich, które w kolejności chronologicznej wymieniono poniższej.

L.p.	Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
1.	24	7d	...wewnętrznej D_2...	...zewnętrznej D_2...
2.	27	1g	...D_2 =0,1 m...	...D_1 = 0,1 m...
3.	29	14g	...D_2 =0,1 m...	...D_1 = 0,1 m....

L.p.	Str.	Wiersz	Jest	Powinno być
4.	51	5g	...z zależności (2.24)...	...z zależności (2.23)...
5.	51	8g	...(2.24)...	...(2.23)...
6.	53	3d	...zależnością (2.23)...	... zależnością (2.24)...
7.	77	8g	...(3.28)...	...(3.29)...
8.	89	4g	...(3.50)...	...(3.52)...
9.	89	10g	...(3.47)...	...(3.49)...
10.	90	5g	...e_1 = 0,001 m.	...e_2 = 0,001 m.
11.	92	6d	...$e/D < 0,1$.	...$e/D > 0,1$.
12.	93	4g	...(3.28).	...(3.29).
13.	93	9d	...względnego przyrostu...	...względnej zmiany...
14.	116	6g	...wywołana poprzez zatkanie...	...wywołana przez zamknięcie...
15.	130	12d	...(tab. 3.2).; uwaga: brak tabeli 3.2	...(tab. 3.4).
16.	142	9g	...(3.107)...	...(3.108)...
17	145	1g	...(3.115).	...(3.116).
18.	147	4d	...przy pomocy obliczeń...	...za pomocą obliczeń...

Do uwag zawartych w tabeli można dodać trzy kolejne o nieco innym charakterze.

19. Str. 14 (spis oznaczeń), str. 21 wz. (2.6) i dalsze strony – symbole lepkości kinematycznej średniej prędkości przepływu wody są nierozróżnialne.
20. Str. 60 w tabeli 2.20 i na str. 61 na rys. 2.17, ten sam symbol h_L oznacza dwie różne wielkości fizyczne.
21. Str. 153 wiersze 9d i 10d, zdanie: „*Jedynie dla rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem silikonowym wartość χ dla wszystkich przepływów jest praktycznie taka sama (zielone znaczniki) i wynosi ok. 2,2%*", nie znajduje potwierdzenia na rys. 3.55.

4.2. Uwagi merytoryczne

Uwagi podano w kolejności chronologicznej.

1. Str. 33 rys. 2.8, wątpliwości budzi lokalizacja króćca impulsowego przy hydroforze wynikająca z braku informacji o jego odległości od wylotu z hydroforu oraz oddalenia od zaworu nr 9.
2. Str. 55 uwagi dotyczące równań (2.31) i (2.32). W rozdziale 2. analizowany jest ustalony turbulentny przepływ nieściśliwego płynu newtonowskiego (wody). Natomiast równania (2.31) i (2.32), dotyczą nieustalonego laminarnego przepływu ściśliwego płynu

newtonowskiego. Zamiast wymienionych równań należało podać równania RANS w formie uproszczonej – ważnej dla analizowanego przepływu.

3. Str. 57 wiersze 6 i 7d, informacja: „*...wybrano te, które pozwalały na uzyskiwanie poprawnych wyników w stosunkowo krótkim czasie.*" skłania do zadania dwóch pytań:
   - w jaki sposób oceniano poprawność wyników symulacji kodem CFD?
   - co było miarą poprawności wyników?
4. Str. 90 rys. 3.13 i str. 91 rys. 3.14, jeżeli wyniki obliczeń dotyczą przewodu cienkościennego o grubości ścianki e_2 = 0,001 m, to w zakresie $D_2/D_1 < 0{,}12$ wyniki pokazane na rys. 3.14 są nieważne, gdyż odnoszą się do przewodu grubościennego.
5. Str. 92 wiersze 9g i 10g, stwierdzenie: „umieszczenie przewodów cienkościennych o sprężystości $E_2 > 0{,}1E_1$ zwiększa maksymalne przyrosty ciśnienia (linia żółta, ciemnoniebieska i zielona)" jest częściowo niezgodne z rys. 3.14.
6. Str. 96 wiersze 8g÷10g, dlaczego założenia do obliczeń dotyczące przewodu grubościennego są identyczne z przyjętymi dla przewodu cienkościennego (str. 90)? (w konsekwencji przewody grubościenny i cienkościenny są nierozróżnialne).
7. Str. 96, rys. 3.17 jest identyczny z rys. 3.13 na str. 90.
8. Str. 96 rys. 3. 17, dla $D_2/D_1 > 0{,}12$ przewód nie jest grubościenny (jest cienkościenny).
9. Str. 98, rys. 3.19 jest identyczny z rys. 3.14 na str. 91.
10. Str. 98 rys. 3.19, dla $D_2/D_1 > 0{,}12$ przewód nie jest grubościenny (jest cienkościenny).
11. Str. 100 tabela 3.1, jaka jest interpretacja fizyczna nieciągłości polegającej na tym, że dla $e_2/D_2 = 0{,}1$, równania (3.72) i (3.82) nie są identyczne (nie przechodzą jedno w drugie)?
12. Str. 101 rys. 3.20, brak jasności co do warunków (założeń) dla których wykonano obliczenia:
    - czy parametry rurociągu przyjęto jak wcześniej, tzn.: E_1 = 200 GPa, D_1 = 0,1 m, e_1 = 0,003 m?,
    - zapis $e_2 = 0{,}1\ D_2 = 0{,}01$ m, jest mylący, gdyż może oznaczać zarówno e_2 = 0,01 m i D_2 = 0,1 m, jak i e_2 = 0,001 m i D_2 = 0,01 m; poprawny (jednoznaczny) zapis powinien mieć postać: $e_2 = 0{,}1D_2$ i D_2 = 0,01 m,
    - w każdym przypadku mamy e_2 = const. i D_2 = const., co wobec D_1 = const. uniemożliwia wykonanie obliczeń c_g/c_c w funkcji D_2/D_1 (rys. 3.20).
13. Str. 102 rys. 3.21, oś odciętych e_2/D_2 dzieli przewody na cienkościenne ($e_2/D_2 < 0{,}1$) i grubościenne ($e_2/D_2 > 0{,}1$). Jak zatem obliczano wartości rzędnych (c_g/c_c) skoro

dziedziny funkcji opisanych równaniami na c_g i c_c są zbiorami rozłącznymi (wzór na c_c jest ważny dla $e_2/D_2 < 0{,}1$ i wzór na c_g jest ważny dla $e_2/D_2 > 0{,}1$)?

14. Str. 103 rys. 3.22 i str. 104 rysunki 3.23 i 3.24, skoro do obliczeń przyjęto $D_1 = 0{,}1$ m i $D_2 = 0{,}01$ m (str. 103 wiersze 5g i 7g), to w jaki sposób zrealizowano zmienność D_2/D_1 od 0 do 1?
15. Str. 106 rys. 3.25, podobnie jak wyżej, czyli: (D_1 = const. i D_2 = const.) $\Rightarrow$ (D_2/D_1 = const.), co sprawia, że zmienność D_2/D_1 na osi odciętych na rys. 3.25 jest niezrozumiała.

Powyższe uwagi w większości mają charakter dyskusyjny i nie podważają najważniejszych osiągnięć ocenianej pracy.

5. Podsumowanie

Praca, jest napisana poprawnym językiem. Stosowana terminologia, nie budzi zastrzeżeń. Autor wykazuje bardzo dobrą znajomość omawianych zagadnień, umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania.

Za oryginalny dorobek naukowy Kandydata należy uznać:

- wyprowadzenie równań na straty ciśnienia w przepływie ustalonym oraz równań na prędkość fali ciśnienia w uderzeniu hydraulicznym w rurociągu z umieszczonym wewnątrz pełnym, grubościennym i cienkościennym przewodem elastycznym,
- zbudowanie stanowiska badawczego i przeprowadzenie badań weryfikujących poprawność wyprowadzonych równań i otrzymanych wyników,
- zbadanie wpływu średnicy przewodu, wytrzymałości materiału użytego do jego wykonania oraz elastyczności ścianek na charakterystykę ustalonego i nieustalonego, ciśnieniowego przepływu wody w rurociągu stalowym zawierającym taki przewód,
- wykazanie, że umieszczenie elastycznego przewodu (światłowodu) wewnątrz stalowego rurociągu wywołuje niewielki wzrost strat ciśnienia w ustalonym przepływie ciśnieniowym oraz tłumi przyrosty ciśnienia i skraca czas trwania uderzenia hydraulicznego.

6. Wniosek końcowy

Reasumując, uważam, że przedstawiona **praca doktorska mgr inż. Michała Kubraka spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim** określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późniejszymi zmianami). **Stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.**