

Dr inż. Sławomir Henclik

Zakład Hydroenergetyki - Ośrodek Hydrodynamiki

Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego

Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku

AUTOREFERAT

przedstawiający opis kariery zawodowej i istotnej aktywności naukowej oraz osiągnięć naukowych, o których mowa w art. 219 ust.1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.) a także innych istotnych informacji

Gdańsk – październik 2022

SPIS TREŚCI	str
1 Imię i nazwisko	3
2 Posiadane dyplomy i stopnie naukowe – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	3
3 Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4 Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.)	4
4.1 Wstęp – znaczenie podjętej tematyki, cel naukowy i zakres badań	4
4.2 Przyjmowane modele matematyczne badanych zjawisk	8
4.3 Badania numeryczne oraz rozwiązania analityczne	13
4.4 Własne badania doświadczalne	18
4.5 Metoda oceny szkodliwości uderzenia hydraulicznego	21
4.6 Podsumowanie	23
4.7 Literatura	24
5 Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej	26
5.1 Działalność naukowa w Wyższej Szkole Morskiej	26
5.2 Działalność naukowa w OBR Centrum Techniki Morskiej przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych	26
5.3 Aktywność naukowa związana z realizacją przewodu doktorskiego w Akademii Marynarki Wojennej	27
5.4 Działalność naukowa w OBR Centrum Techniki Morskiej po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych	27
5.5 Aktywność naukowa w OBR Centrum Techniki Morskiej związana ze współpracą zagraniczną	28
5.6 Działalność naukowa w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN	29
6 Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych, popularyzujących naukę lub sztukę oraz innych	29

1. Imię i nazwisko: Sławomir Henclik**2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe, z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

- 1977** Świadectwo dojrzałości/świadectwo ukończenia V Liceum Ogólnokształcącego im. Jakuba Jasińskiego we Wrocławiu, w klasie o profilu matematyczno-fizycznym.
- 1983** Uzyskanie tytułu magistra inżyniera Podstawowych Problemów Techniki w zakresie Fizyki Technicznej. Politechnika Gdańska, Instytut Fizyki. Dyplom z oceną bardzo dobry.
- 1997** Uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej „budowa i eksploatacja maszyn”. Akademia Marynarki Wojennej im. Bohaterów Westerplatte w Gdyni, Wydział Mechaniczno-Elektryczny. Tytuł rozprawy doktorskiej: „Opracowanie metod doboru charakterystyk elementów podatnych w układach amortyzacyjnych mechanizmów okrętowych”. Promotor: kmdr dr hab. inż. Stanisław Dobrociński, prof. AMW.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

15.09.1983 – 15.11.1983	Wyższa Szkoła Morska (obecnie Uniwersytet Morski) w Gdyni. Instytut Matematyki, Fizyki i Chemii. Zatrudniony na stanowisku asystent-stażysta.
16.11.1983 – 31.12.2005	Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Centrum Techniki Morskiej w Gdyni. Oddział Pól Fizycznych Okrętu/Systemów Broni Podwodnej, Zakład Wibroakustyki i Odporności Udarowej. Po dokończeniu stażu zatrudniony na stanowiskach: asystent, st. asystent, specjalista, st. specjalista, asystent nauk., adiunkt (1999-2005).
01.04.2008 – do chwili obecnej	Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku, Ośrodek Hydrodynamiki, Zakład Hydroenergetyki. Zatrudniony na stanowiskach: st. specjalista, adiunkt (2009-2017), st. specjalista.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.)

Jako osiągnięcie naukowe, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.) wskazuję cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2b w/w ustawy, pod wspólnym tytułem:

Dynamiczne oddziaływanie ciecż–struktura w przebiegu zjawiska uderzenia hydraulicznego w elastycznym układzie rurociągowym

Na powyższe osiągnięcie składa się dziesięć artykułów naukowych wyszczególnionych w Wykazie osiągnięć naukowych, rozdz. 1, oznaczonych **A1–A10**. Poniżej omówiono ogólnie to osiągnięcie pod względem merytorycznym, przedstawiając w skrócie osiągnięte wyniki, z powołaniem się na badania opisane w publikacjach wnioskodawcy.

4.1. Wstęp - znaczenie podjętej tematyki, cel naukowy i zakres badań

4.1.1. Wprowadzenie – przepływy nieustalone ciecży w rurociągach

Przepływy nieustalone ciecży w rurociągach mogą występować dość powszechnie a ich przebieg często zakłóca prawidłowe funkcjonowanie układu hydraulicznego [1,2]. Zjawiska te powstają na ogół w wyniku zaburzenia warunków przepływu prowadzącego do nagłej zmiany prędkości ciecży, czemu towarzyszą wahania ciśnienia słabo ściśliwego płynu. Generowane zaburzenia rozchodzą się w rurociągu (przewodzie zamkniętym) jako fale sprężyste i mogą stanowić zagrożenie dla prawidłowej pracy układu. Efekty te uzasadniają często stosowaną nazwę zjawiska – uderzenie hydrauliczne (UH, ang. *water hammer* = WH). Zjawisko to jest przedmiotem badań naukowych na świecie już od ponad stu lat a za pionierskie uważa się prace Żukowskiego, który wyprowadził wzór określający skokowy przyrost ciśnienia Δp wywołany nagłą zmianą prędkości Δv płynu o gęstości ρ :

$$\Delta p = -\rho c \Delta v \quad (1)$$

Parametr c jest prędkością fal sprężystych rozchodzących się w cieczy i wyraża się formułą:

$$c^2 = \frac{K/\rho}{1 + \phi(KD)/(Ee)} \quad (2)$$

K to moduł sprężystości objętościowej ciecży, E – moduł Younga materiału rurociągu, D – jego średnica, e – grubość ścianek. Parametr ϕ zależy od przyjmowanych założeń, szczegółów modelowania i mocowania rurociągu [1,2]. Dla bieżących analiz, przy założeniu cienkościennego rurociągu przyjmuje się $\phi = 1 - \mu^2$, gdzie μ jest współczynnikiem Poissona materiału rurociągu. Ze wzoru (1) wynika, że wzrosty ciśnienia UH mogą być znaczne, co może wywołać duże naprężenia obwodowe dane wzorem (rurociąg cienkościenny):

$$\sigma_c = \Delta p D / (2e) \quad (3)$$

W instalacjach energetyki wodnej parametr D/e może przyjmować wartości większe niż 100 co stwarza zagrożenie wystąpienia niebezpiecznych dla rurociągu naprężeń. Także w innych

sytuacjach powstające stany nieustalone mogą prowadzić do zakłócania pracy układu. Poza układami energetyki wodnej, UH mogą pojawiać się w instalacjach wodociągowych, systemach chłodzących (na przykład reaktorów atomowych), w instalacjach do przesyłu ropy naftowej lub chemikaliów, w przewodach paliwowych silników spalinowych, układach wspomagania hamowania (ABS) i w innych instalacjach. Teorie przepływów nieustalonych stosuje się także, w prostszej lub bardziej złożonej formie, do modelowania przepływów krwi w tętnicach [3,4,5] a nawet mechanizmu generowania głosu w układzie mowy człowieka [6]. Klasyczna teoria UH zakłada, że poza wpływem sprężystości ścianek we wzorze (2), układ rurociągowy jest na tyle sztywny, że jego ruch nie wpływa na przepływ a oddziaływanie ciecz–struktura (ang. *fluid–structure interaction* = FSI) uwzględnia się quasi–statycznie. Przepływ nieustalony w prostym odcinku rurociągu, modeluje się jednowymiarowo (1D, ang. *one-dimensional*) za pomocą dwóch hiperbolicznych równań cząstkowych – zachowania masy i pędu. Gdy jednak rurociąg lub jego system mocujący cechuje się istotną elastycznością a jego ruch lub odkształcenia są znaczące, to mogą one wpływać na przepływ i prawidłowy opis wymaga uwzględnienia dynamicznych efektów FSI [7-12]. Podejście takie pozwala znacząco rozszerzyć klasę zagadnień, które można efektywnie modelować za pomocą tak sformułowanej teorii.

4.1.2. Dynamiczne oddziaływanie ciecz-struktura

Prace rozszerzające teorię klasyczną UH o dynamiczne efekty FSI datuje się w literaturze światowej od II połowy XX wieku. Stopniowy rozwój badań nad teorią WH-FSI (określaną jako rozszerzona teoria UH – ang. *extended WH*) zaowocował kompleksowym podejściem do tych zagadnień przez zespół naukowców z Uniwersytetu Michigan w drugiej połowie lat 80-tych [11-14]. Zaproponowali oni m.in. tak zwany model standardowy [9] zjawiska, do którego numerycznego rozwiązywania w dziedzinie czasu postulowali metodę charakterystyk (ang. *method of characteristics* = MOC) [12]. Oprócz ośrodka w Michigan, w końcowych latach XX wieku istotne zaangażowanie naukowe w dziedzinie WH-FSI można wiązać m.in. z University of Dundee i ośrodkami w Holandii (Delft UT, Delft Hydraulics, Eindhoven UT) oraz m.in. pracami A.S. Tijsselinga [7,9,15,16,17]. Od kilkunastu lat rosnące zainteresowanie tą tematyką obserwuje się w różnych ośrodkach naukowych na świecie.

Model standardowy jest uznany i stosowany (niekiedy z pewnymi modyfikacjami) do dziś. Opisuje on ruch prostoliniowego odcinka przewodu z cieczą, zakładając 1D przepływ cieczy i 3D ruch rurociągu. Określa się go często jako model 14-równaniowy (ang. *fourteen equation model* = 14E) i opisany jest on za pomocą 14 równań różniczkowych cząstkowych (PDE) pierwszego rzędu, typu hiperbolicznego. Równania te definiuje się w czterech, wzajemnie niesprzężonych grupach stopni swobody (ang. *degrees of freedom* = DOF). Pierwsza, opisuje ruch podłużny rurociągu z cieczą za pomocą czterech równań. Dwa definiują – analogicznie jak w klasycznej teorii UH – przepływ cieczy, jednak uwzględniają sprzężenie ze strukturą. Pozostałe dwa modelują drgania podłużne rurociągu uwzględniając sprzężenie zmiennych strukturalnych z przepływowymi. Druga grupa stopni swobody opisuje drgania skrętne rurociągu za pomocą dwóch równań, trzecia i czwarta – drgania poprzeczne w dwóch wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. Każdy z ruchów poprzecznych modelowany jest za pomocą czterech równań opisujących fale ścinania sprzężone z falami zginania (model belki Timoshenki). Prostoliniowe odcinki są połączone w węzłach, gdzie

formułuje się warunki brzegowe. Jeśli cała struktura tworzy płaską sieć i nie ma wymuszeń spoza tej płaszczyzny, to taki układ można modelować za pomocą 8 równań (4 podłużne i 4 poprzeczne w płaszczyźnie rurociągu), które tworzą model płaski 8E. W praktyce często stosowany jest model jednowymiarowy WH-FSI, zwany cztero-równaniowym (4E). Opisuje on ruch podłużny układu i okazuje się, że sprawdza się dobrze w wielu sytuacjach rzeczywistych [9,16]. Autor wniosku zaproponował dla niego nazwę „model podstawowy”.

W modelowaniu zjawisk WH-FSI uwzględnia się trzy rodzaje sprzężenia ciecz–struktura, to jest sprzężenie tarcia, Poissona i w złączach. Najsłabszym jest pierwszy z tych efektów, który w podstawowym podejściu można opisywać za pomocą stacjonarnego modelu tarcia. Naprężenia styczne dane są w takim przypadku wzorem, w którym uwzględnia się względną prędkość cieczy v i ścianek rurociągu w (λ jest współczynnikiem oporu):

$$\tau_s = \lambda \rho (v - w) |v - w| / 8 \quad (4)$$

Model quasi-stacjonarny, mimo że często stosowany, nie oddaje jednak w pełni adekwatnie charakteru przepływu nieustalonego i dlatego naukowcy już od lat proponują różne, niestacjonarne modele tarcia, lepiej opisujące przebieg zjawiska. Mechanizm sprzężenia FSI wywołanego zjawiskiem Poissona wynika z generowania odkształceń wzdłużnych będących efektem naprężeń obwodowych danych wzorem (3). Odkształcenia te mogą propagować się, z prędkością c_s , w ściankach rurociągu i w innych jego przekrojach generować dodatkowe oscylacje ciśnienia. Prędkość c_s dana jest wzorem (ρ_s jest gęstością materiału rurociągu):

$$c_s^2 = E / \rho_s \quad (5)$$

Ponieważ prędkość ta jest w typowych przypadkach technicznych (stalowy lub miedziany rurociąg z wodą) około 3-4 razy większa niż prędkość fali w cieczy, mechanizm takiej propagacji zaburzeń określa się jako falę poprzedzającą (ang. *precursor wave* = PC). Sprzężenie w złączach jest najsilniejszym z wymienionych efektów i jest skutkiem niezrównoważonych sił jakie mogą pojawiać w węzłach rurociągu, takich jak kolana, zgięcia, przewężenia, zawory, sztywne zakończenia. Jeśli rurociąg lub jego mocowanie są elastyczne, siły te powodują jego ruch, który będzie dynamicznie wpływał na przepływ. O ile dwa pierwsze rodzaje sprzężeń wyraża się poprzez odpowiednie człony w równaniach ruchu, to sprzężenie w złączach modeluje się za pomocą odpowiednich warunków brzegowych (WB).

Uważa się, że stosowane modele są nieźle zweryfikowane w praktyce choć ciągle pracuje się nad ich szczegółami, uwzględnieniem w opisie zjawiska nowych efektów a także proponuje różne metody rozwiązania. Znaczne możliwości badań wiążą się z implementacją różnych WB lub wymuszeń, w tym także zmiennych w czasie, co umożliwia symulacje zachowania różnorodnych układów rzeczywistych. Częstym sposobem rozwiązywania omawianych zjawisk są metody w dziedzinie czasu (głównie numeryczne), jednak stosuje się też metody analityczne, w tym w dziedzinie częstotliwości [15].

4.1.3. Motywacja, cel naukowy i zakres badań

Zjawiska przepływów nieustalonych w rurociągach są przedmiotem zainteresowania w Zakładzie Hydroenergetyki IMP PAN już od lat 80-tych. Motywacją tych prac są zagadnienia eksploatacji i bezpieczeństwa w różnych układach hydraulicznych, w tym energetyki wodnej. Prowadzone badania dotyczą m.in. podstawowego modelowania zjawiska

dla różnych WB, kwestii bezpieczeństwa układów narażonych na występowanie UH, badania modeli niestacjonarnych strat tarcia oraz zjawisk dwufazowych (w tym rozerwanie strumienia), jak też wykorzystania teorii przepływu nieustalonego w metodach pomiaru natężenia przepływu. Obszerny opis różnych prac w tym zakresie zawiera monografia [2].

Rozszerzenie tematyki prac o zagadnienia dynamicznego oddziaływania ciecz–konstrukcja było więc zrozumiałe i zasadne. Celem wnioskodawcy były badania przebiegów uderzenia hydraulicznego (przepływów nieustalonych w rurociągach) w sytuacji znaczącego wpływu na to zjawisko dynamicznego oddziaływania FSI, w układach przepływowych o różnej konfiguracji. Prace te objęły zarówno modelowanie teoretyczne (w tym numeryczne) przebiegów zjawiska jak też badania doświadczalne a szczegółowy ich zakres określono poniżej. Prowadząc te badania autor oparł się na podstawach istniejącego stanu wiedzy wprowadzając przy tym własne koncepcje i rozwiązania. Do modelowania numerycznego wykorzystywał w głównej mierze model 4E zjawiska rozwiązywany w dziedzinie czasu metodą charakterystyk. Opracował własną implementację numeryczną tego modelu w oparciu o efektywną „metodę falową” wraz z iteracyjnym uwzględnianiem strat tarcia. Wykonał oprogramowanie do numerycznych symulacji WH-FSI. Pierwszy własny, ogólny opis zjawiska, stosowanych modeli oraz opracowanych algorytmów i testów wykonanego oprogramowania autor wniosku przedstawił w publikacji [A10]. W kolejnej pracy [A9] dokonano porównania rezultatów numerycznych z wynikami badań doświadczalnych prowadzonych wcześniej w IMP PAN. Stosowany na tym etapie model numeryczny zakładał jednak sztywne WB w węzłach mocowania rurociągu. Do zagadnień omawianych w tych pracach autor wniosku wracał więc także w swoich późniejszych badaniach i publikacjach posługując się nowymi, rozwiniętymi modelami oraz opracowanymi WB. W szczególności dotyczyło to warunku brzegowego w węźle zamocowania rurociągu za pomocą elementu sprężystego o własnościach tłumiących (podpory wiskoelastyczne) [A8,C4,A4]. Podejście takie zawierało element nowości, gdyż wcześniej, według wiedzy autora, różni naukowcy ograniczali analizę wpływu mocowania do podpór bez tłumienia [10,11,12,17]. Znaczenie efektu tłumienia w podporach zostało też docenione przez innych [18]. Wnioskodawca przedstawił również sposób rozwiązania ważnego WB na zaworze o różnym stopniu otwarcia, utwierdzonego za pomocą wiskosprężystego mocowania [A7,A3]. Opracowane modele i wykonane programy posłużyły do symulacji zjawisk WH-FSI a uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie szeregu wniosków, z których większość została zweryfikowana, albo w oparciu o wyniki eksperymentalne (obce lub własne), albo innymi metodami.

Niezależnie od możliwości weryfikacji określonych symulacji numerycznych, badania doświadczalne, które autor wykonał wraz z zespołem Zakładu Hydroenergetyki w ramach realizowanego projektu badawczego pozwoliły na sformułowanie dalszych wniosków, które są omawiane odrębnie [A5,C5]. Zarejestrowane, obszerne dane eksperymentalne, stanowią też wartościowy materiał do dalszych analiz. Kolejnym zagadnieniem, rozwiązany w oryginalny sposób przez wnioskodawcę i stanowiącym istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej jest zaproponowanie metody oceny szkodliwości UH. Zagadnienie to ma duże znaczenie, lecz nie jest proste do realizacji, gdyż przebieg i charakter zjawiska zależy od różnych czynników w tym, od efektów FSI, które mogą w znaczący sposób utrudniać tę ocenę. Dlatego bezwzględne amplitudy fali ciśnienia nie mogą być jedynym wyznacznikiem

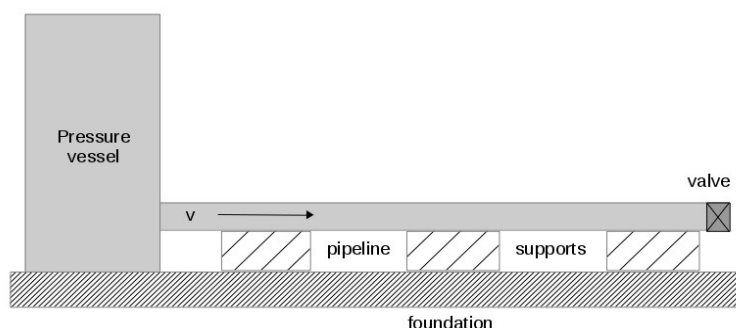
szkodliwości zjawiska. Znaczenie ma też między innymi kształt przebiegu i tempo zaniku oscylacji. Pewnym rozwiązaniem mogłaby być analiza widmowa przebiegu (na bazie FFT), jednak autor zaproponował inny, efektywniejszy sposób – metodę widm odpowiedzi udarowej (ang. *shock response spectrum* = SRS) stosowaną w mechanice konstrukcji do pewnych specjalistycznych zastosowań [19,C10]. Opisał on tę metodę, opracował jej implementację numeryczną oraz przedstawił wyniki jej funkcjonowania w praktyce [A1].

Chociaż w swoich badaniach wnioskodawca posługiwał się głównie modelem 4E WH-FSI, opracował on też szereg oryginalnych rozwiązań w zakresie implementacji modelu 14E (standardowego). Tematyce tej poświęcony jest głównie artykuł [A6], ale stanowiła też ona przedmiot referatu konferencyjnego [C8] a wstępnie była omawiana w pracy [A10]. Proponowana metodyka numerycznego rozwiązania modelu oparta jest na metodzie charakterystyk i odpowiedniej konstrukcji siatki obliczeniowej. Warunek brzegowy w węźle lekko-sprężystego mocowania rurociągu został sformułowany w postaci analogicznej jak w przypadku 1D, jednak wymagał on specjalnego podejścia w przypadku osobliwej macierzy podatności mocowania. Oryginalne rozwiązanie tego problemu wnioskodawca przedstawił w publikacji [A2]. W pracy tej omówiono też problem określania macierzy podatności sprężystych uchwytów stosowanych w badaniach doświadczalnych do mocowania rurociągu.

4.2. Przyjmowane modele matematyczne badanych zjawisk

4.2.1. Założenia i modele fizyczne

Założenia do modelowania zjawisk WH-FSI są formułowane i dyskutowane w większości przeglądowych prac poświęconych tej problematyce [7-9,16] a także w pracach autora [A4,A6,A10]. Generalnie zakłada się liniowo-sprężyste właściwości materiału rurociągu jak i cieczy oraz jej słabą ściśliwość i małe prędkości przepływu ($v \ll c$). Do modelowania tarcia cieczy o ścianki przyjmowany jest w obecnym podejściu model quasi-stacjonarny, w którym uwzględnia się względną prędkość cieczy i ścianek. Bezwładność cieczy przy drganiach struktury brana jest pod uwagę tylko w liniowym ruchu poprzecznym. Poszczególne odcinki rurociągów połączone są w węzłach, w których formułuje się warunki brzegowe. Do badań numerycznych definiuje się często pewien ogólny model fizyczny układu pokazany na rys. 1.



Rys. 1. Ogólny model fizyczny rurociągu przyjmowany do badań WH-FSI [A4]

Składa się on ze zbiornika początkowego, który generuje określone ciśnienie p_z (na ogół stałe), prostoliniowego rurociągu, zamocowanego do fundamentu (system mocowania może

być wiskosprężysty lub sztywny) i zaworu końcowego połączonego z rurociągiem najczęściej w sposób sztywny. W stanie początkowym zbiornik wymusza przepływ cieczy z prędkością v_0 wynikającą z ciśnienia na wlocie oraz strat tarcia w układzie. W chwili zamknięcia zaworu wymuszany jest stan nieustalony, który zależy od parametrów układu a także od sposobu zamykania zaworu. Dla różnych wariantów takiego układu autor wykonał symulacje numeryczne analizowane szczegółowo w jego publikacjach.

4.2.2. Model podstawowy WH-FSI

Model 4E jest często stosowanym modelem w analizie zjawisk WH-FSI. Opisywany jest on czterema hiperbolicznymi PDE [8,9,A4]. Równania dla cieczy mają postać:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \sin \alpha - \frac{4 \tau_s}{\rho D} \quad \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 2 \mu \frac{\partial w}{\partial x} \quad (6)$$

Ruch struktury opisują pozostałe dwa równania:

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \sigma}{\partial x} = -g \sin \alpha + \frac{\tau_s}{e \rho_s} \quad \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{1}{\rho_s c_s^2} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\frac{\mu D}{2 E e} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (7)$$

W równaniach tych przez σ oznaczono podłużne naprężenia w materiale rurociągu. Składnik grawitacyjny wynika z nachylenia α rurociągu względem poziomu a człony odpowiedzialne za sprzężenie tarcia i Poissona są proporcjonalne odpowiednio do τ_s oraz do μ . Przekształcenie powyższych równań zgodnie z metodą charakterystyk prowadzi do dwóch par równań kompatybilności (RK). Zagadnienie to jest omówione przez autora wniosku w artykule [A4], a także we wcześniejszych publikacjach [A8,A9,A10]. Charakterystyczną cechą zaproponowanej przez autora implementacji modelu jest m.in. jej czytelna postać pozwalająca na wstępną analizę już na podstawie formy otrzymanych RK. Każda para tych równań definiuje jedną z fal – WH lub PC, które rozchodzą się z nieco zmienionymi prędkościami. Prędkość c_0 fali UH jest nieco mniejsza od c , prędkość c_1 fali PC nieco większa od c_s . Fale te nie są jednak „czystymi” falami w cieczy i w strukturze, gdyż odpowiednie zmienne „falowe” (uogólnione) – prędkości u i naprężenia s zawierają dodatkowy wkład od „drugiego ośrodka” (cieczy lub struktury) wynikający ze sprzężenia Poissona. Zmienne falowe zdefiniowane są wzorami (fala WH ma indeksy 0 a PC – indeksy 1):

$$u_0 = v + S w \quad s_0 = r - \tilde{S} q \quad u_1 = R v - w \quad s_1 = \tilde{R} r + q \quad (8)$$

Powyżej wprowadzono znormalizowane naprężenia $r = p/(\rho c_0)$ oraz $q = \sigma/(\rho_s c_1)$ a parametry R , S (oraz te ze znakiem tyldy) są małymi, bezwymiarowymi współczynnikami zależnymi od stałych materiałowych (są zerowe przy braku sprzężenia Poissona, $\mu=0$) zdefiniowanymi w pracach autora, m.in. [A4]. Rozwiązując równania (8) ze względu na zmienne fizyczne widać, że będą one zawierać dodatkowy wkład od drugiej fali, związany ze efektem Poissona. Na przykład $v = (u_0 + S u_1)/(1 + RS)$, gdzie wkład od fali PC „dodaje się” z małym współczynnikiem S ($S < 1$, a nawet $S \ll 1$). Efekty te są widoczne nie tylko na przebiegach numerycznych, ale też na wybranych wynikach doświadczalnych [A4,A5,A9]. Równania RK całkuje się z odpowiednim krokiem otrzymując równania różnicowe, które po uwzględnieniu WB, pozwalają określać numerycznie ruch układu w kolejnych chwilach czasu. Zastosowana metoda rozwiązania ma też inne zalety, między innymi to, że każda para RK może być

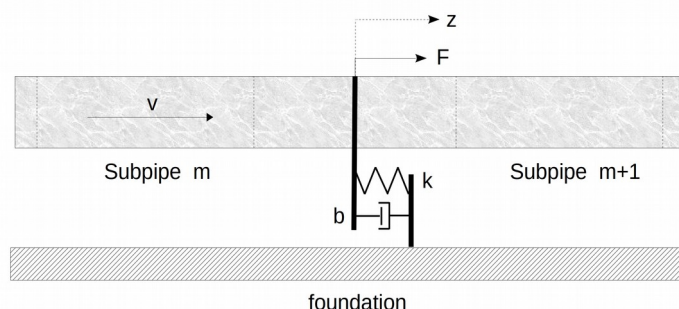
rozwiązywana „prawie” niezależnie w swoich zmiennych falowych, a wyrazy modelujące sprzężenie tarcia i straty (relatywnie nieduże) są traktowane w poszczególnych krokach jako ustalone parametry, które mogą być korygowane iteracyjnie.

4.2.3. Warunki brzegowe

Standardowe warunki brzegowe dla cieczy uwzględniane w rozwiązywaniu zagadnienia obejmują równanie ciągłości oraz równanie określające straty w złączu i były definiowane w większości prac autora, omawiających model matematyczny. Równanie ciągłości sprowadza się na ogół, przy przyjmowanych założeniach do stałej prędkości cieczy po obu stronach złącza a straty ciśnienia definiowane są równaniem określającym lokalny współczynnik strat ζ . Tym samym ciśnienia po obu stronach złącza – lewej (L=ang. *left*) i prawej (R=ang. *right*) są związane w następujący sposób:

$$p_L = \frac{1}{2} \zeta \rho (v - w) |v - w| + p_R \quad (9)$$

W większości standardowych sytuacjach straty w złączach są nieduże więc w przyjmowanym modelowaniu mogły być uwzględniane w WB wg powyższej formuły w sposób iteracyjny. W przypadku zaworu lokalny współczynnik strat ζ może przyjmować dowolnie duże wartości, może też zależeć od czasu. Wówczas straty obliczamy jawnie. W granicznym przypadku zamkniętego zaworu (sztywne zakończenie rurociągu) mamy $\zeta \rightarrow \infty$ więc warunek powyższy przyjmuje postać $v=w$. Metoda rozwiązania tego warunku dla zaworu, także w przypadku jego elastycznego mocowania była omawiana między innymi w pracach [A3,A7]. Sposób zamocowania węzła, w proponowanym sposobie modelowania, jest podstawowym strukturalnym WB. Sztywne mocowanie oznacza, że prędkość węzła $w=0$. Dla mocowania



Rys.2. Wiskoelastyczne mocowanie węzła wewnętrznego rurociągu

wiskoelastycznego, jak przedstawiono na rys. 2, autor zaproponował metodę modelowania opartą na równaniu ruchu węzła o masie m . Równanie to można zapisać w postaci ogólnej:

$$m \ddot{z} + b \dot{z} + k z = F_{liq} + F_{pipe} + F \quad (10)$$

Po prawej stronie mamy siły od cieczy F_{liq} , od rurociągów F_{pipe} oraz siłę zewnętrzną F , jaka może wystąpić w złączu (często przyjmujemy $F=0$). W celu numerycznego rozwiązania równanie (10) przekształcamy do postaci skończonej wyrażając szczegółową postać sił od cieczy i rurociągów za pomocą różnicowych RK oraz WB, dzięki czemu po normalizacji (podzieleniu równania przez odpowiednio dobraną stałą) jego prawą stronę możemy przedstawić jako liniową funkcję prędkości w i zapisać w postaci $-Pw+a$, gdzie a zmienia się

w kolejnych krokach czasu a P jest stałe dla danego złącza. Stosując algorytm Newmarka, zmienne ruchu po lewej także wyrażamy jako funkcję prędkości w nowej chwili czasu. W ten sposób otrzymujemy liniowe równanie na prędkość w złącza, którego rozwiązanie, w kolejnych krokach czasu, pozwala obliczać tę wielkość i w konsekwencji także pozostałe zmienne. Autor rozwiązał omawiany WB nie tylko dla złącza wewnętrznego otrzymując odpowiednie wzory na wielkości P oraz a . Modelowanie numeryczne opisanego WB jest przedmiotem różnych prac wnioskodawcy – w publikacji [A8] koncepcja warunku danego równaniem ruchu (10) została opisana po raz pierwszy a bardziej szczegółową analizę i modelowanie w tym zakresie przedstawiono w artykule [A4]. Zagadnieniem tym autor zajmował się także w innych pracach i publikacjach, m.in. [C4,C1]. Metodyka rozwiązania jest podobna, gdy w węźle mocowanym wiskoelastycznie znajduje się zawór z tym, że wówczas uwzględniamy jawnie nieliniowe równanie strat ciśnienia (9).

4.2.4. Przepływy energii i mechanizmy jej rozpraszania

Przepływy energii w przebiegu zjawiska WH-FSI są ważnym elementem rzutującym na jego charakter. Pozornie mogłoby się wydawać, że dynamiczne oddziaływanie FSI będzie powodować obniżenie amplitud fali ciśnienia z uwagi na transfer energii z cieczy do struktury. Jednak nie jest to jednoznaczna prawidłowość co podkreślano już dość dawno [11]. Wynika to ze złożonego charakteru zjawiska, w tym z efektów falowych i możliwości powrotnego przepływu energii do cieczy. Jednak różne mechanizmy strat, także w strukturze, wpływają w ogólności na łagodzenie przebiegu stanów przejściowych. W teorii klasycznej UH głównym efektem powodującym rozpraszanie energii UH jest mechanizm tarcia cieczy wynikający z jej lepkości i wpływu ścianek rurociągu (tarcie cieczy o ścianki, ang. *liquid – pipe-wall friction losses*). W przepływach ustalonych odpowiednio opracowane zależności pozwalają modelować te straty z dużą dokładnością. Zależności (quasi-) stacjonarne bywają też stosowane do przepływów nieustalonych, choć na ogół powoduje to pewne niedoszacowanie strat. Dlatego już od lat naukowcy proponują różne niestacjonarne modele tarcia i prowadzą ich weryfikację [20-24]. Zastosowanie tych modeli do rozszerzonej teorii UH wymagać jednak powinno odpowiedniej adaptacji, która na ogół uwzględniać będzie względną prędkość cieczy i ścianek. Drugim typem strat hydraulicznych są straty lokalne, które z reguły są modelowane za pomocą formuł quasi-stacjonarnych (9).

Istotnym źródłem strat w przebiegu UH z FSI są straty strukturalne. W najprostszy sposób można je modelować za pomocą jednego mechanizmu zastępczego wprowadzając odpowiedni człon do równań ruchu i kalibrować taki model [14]. Alternatywny i bardziej uzasadniony fizycznie sposób to identyfikacja różnych mechanizmów strat i odpowiednie modelowanie każdego z nich. Mechanizm interesujący naukowców już od dawna wynika z właściwości sprężysto-tłumiących materiału rurociągu określany jest jako wiskoelastyczność (ang. *viscoelasticity* = VE). Dotyczy on przede wszystkim rurociągów z tworzyw sztucznych i był analizowany przez badaczy w różny sposób, z czasem z zastosowaniem coraz bardziej zaawansowanych modeli [25,26]. Wnioskodawca także zaproponował wstępnie uproszczony model rozpraszania wynikającego z właściwości materiału rurociągu i sformułował podstawowe wnioski w tym zakresie [A8]. W proponowanym podejściu uwzględnił też możliwość tarcia rurociągu o otoczenie zewnętrzne. Zagadnienia te nie były jednak przez autora dalej rozwijane. W artykule [A8] przedstawił on też koncepcję modelowania

tłumienia, jakie może wystąpić w sprężystych podporach rurociągu w oparciu o WB (10). Tę tematykę autor wniosku rozwijał w swoich kolejnych pracach [C4,A4].

Oprócz przedstawionych, podstawowych form rozpraszania energii, które jednoznacznie da się zidentyfikować jako związane z cieczą lub ze strukturą, w układzie mogą też istnieć różne inne mechanizmy strat. Mogą one być wywołane przez pewne specjalne elementy układu rurociągowego, analizowane przez różnych naukowców, między innymi przez autora wniosku [A3]. Mogą to też być inne, czasami złożone efekty, powodujące zmniejszanie lub zmiany kształtu amplitud fali UH [27]. Zjawiska takie wskazywane były także przez autora w artykule poświęconym własnym badaniom doświadczalnym [A5]. Jeden z zaobserwowanych wówczas efektów polegał na szybszej redukcji amplitudy fali ciśnienia w układzie o mniejszej sztywności mocowania i jest omawiany w rozdz. 4.4.2.

4.2.5. Model standardowy zjawiska

W oryginalnej pracy [12] jej autorzy postulowali do rozwiązywania równań modelu standardowego metodę charakterystyk (MOC). Przedstawili układ równań wyjściowych modelu oraz finalną postać równań kompatybilności otrzymanych po zastosowaniu transformacji zgodnej z MOC. Nie omawiali jednak szczegółów zastosowanej metodyki numerycznej rozwiązywania tych równań. W późniejszej praktyce, inni badacze stosowali też odmienne metody rozwiązywania, w tym oparte na metodzie elementów skończonych (MES), stosując na przykład techniki mieszane (MES+MOC).

W swoich badaniach autor wniosku zaproponował numeryczną implementację modelu standardowego opartą w pełni na metodzie charakterystyk. Wstępne koncepcje w tym zakresie omawiane były już w publikacji [C8] jednak bardziej kompleksowo problem ten jest tematem artykułu [A6]. Zaproponowana metoda numerycznego rozwiązywania równań kompatybilności opiera się na odpowiedniej strukturze siatki numerycznej. Sformułowano warunek jaki powinien spełniać przestrzenny rozmiar oczka tej siatki. Przeanalizowano też pewne szczegółowe założenia modelu, proponując na przykład, alternatywną (względem prac innych autorów) zależność do obliczania współczynnika ścinania, opartą na wynikach przedstawionych w pracy [28]. Opracowana przez autora, numeryczna implementacja modelu standardowego wymaga obecnie praktycznej realizacji w postaci dopracowania pewnych algorytmów oraz wykonania i uruchomienia oprogramowania.

Warunek brzegowy w węźle elastycznego zamocowania został sformułowany w analogicznej formie (10) jak w przypadku 1D z tym, że z uwagi na ruch 3D rurociągu ma on postać równania macierzowego (6x6). Postać tego warunku jest dyskutowana przez autora bardziej szczegółowo w artykule [A2], w którym przeanalizował on też ogólny przypadek, gdy macierz podatności mocowania może być osobliwa. Nie można wówczas zapisać tego WB w postaci standardowego równania ruchu. Wnioskodawca pokazał jednak, że można sformułować równanie niższego rzędu (na przykład 5x5) z odpowiednio przetransformowaną macierzą sztywności. W artykule [A2] zaproponowano też sposób określania macierzy podatności specjalnych uchwytów sprężystych zastosowanych do mocowania rurociągu w badaniach laboratoryjnych (rozdz. 4.4.1). Porównano wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych oraz pomiarów doświadczalnych uzyskując zadowalające rezultaty.

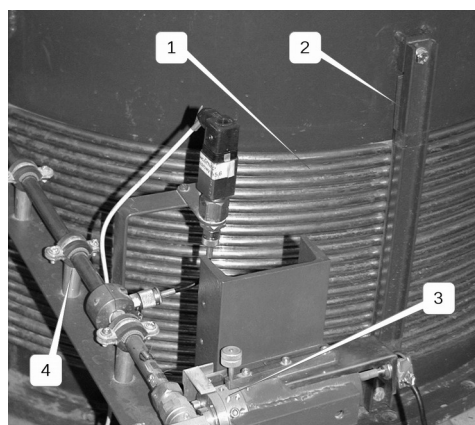
4.3. Badania numeryczne zjawiska oraz rozwiązania analityczne

4.3.1. Program komputerowy i jego rozwój

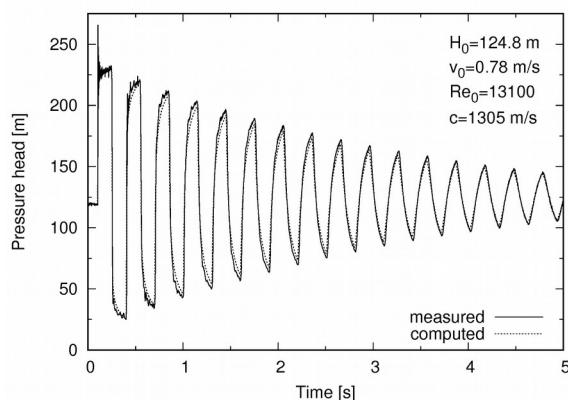
Na podstawie opracowanych algorytmów wnioskodawca wykonał program komputerowy do modelowania numerycznego przebiegów WH-FSI w oparciu o model 4E. Pozwala on na symulacje przebiegu stanów nieustalonych w dziedzinie czasu dla zdefiniowanego układu hydraulicznego – w tym warunków brzegowych oraz początkowych. Program jest napisany w języku Pascal w standardzie *Free Pascal Compiler* i skompilowany do pracy w SO Linux. Jest on systematycznie rozwijany a pierwszy opis stosowanych algorytmów i testy numeryczne zaprezentowano w artykule [A10]. Kolejne wersje zawierały sukcesywnie wprowadzane ulepszenia i umożliwiały symulację zjawiska coraz efektywniej i w szerszym zakresie. Uwzględniały nowe efekty oraz warunki brzegowe i początkowe, co umożliwiało prowadzenie modelowania w zróżnicowanych konfiguracjach. Finalnie zastosowano między innymi iteracyjny sposób uwzględniania strat tarcia cieczy o ścianki, metodę falową numerycznego całkowania równań oraz lepko-sprężyste warunki brzegowe w punktach mocowania rurociągu. W specjalnej wersji programu zaimplementowano i przebadano wstępnie uproszczony model strat w materiale rurociągu. Ważnym elementem rozwoju programu było opracowanie procedur służących modelowaniu WB na wiskoelastycznie mocowanym zaworze o zmiennym w czasie stopniu otwarcia.

4.3.2. Modelowanie przebiegów UH w specjalnym układzie doświadczalnym

Jednym z pierwszych zastosowań i prób testowania wykonanego własnego oprogramowania było modelowanie przebiegów UH zarejestrowanych w ramach wcześniejszych badań doświadczalnych realizowanych w IMP PAN, które miały na celu m.in. weryfikację niestacjonarnych modeli tarcia [21,22] oraz badania przepływów nieustalonych z rozerwaniem strumienia (ang. *column separation* = CS). Testowany rurociąg był mocowany stosunkowo sztywno, przy czym znaczna jego część była nawinięta na stalowy cylinder jak pokazano na rys. 3 (fotografia adaptowana z badań [22]). UH wywołyвано przez szybkie zamknięcie zaworu odcinającego w ustalonym przepływie początkowym. W pracy [A9] przedstawiono bardziej szczegółowy opis i schemat układu pomiarowego (skrócony opis

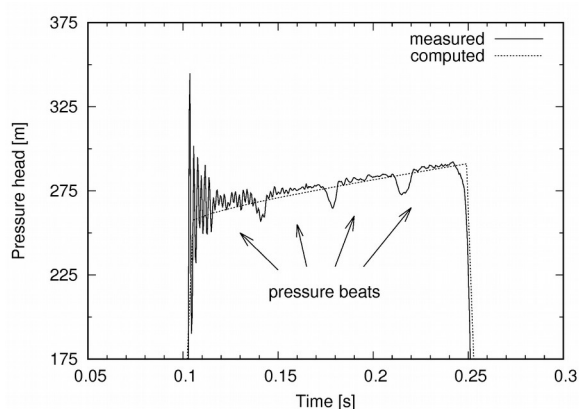


Rys. 3. Widok nawiniętej części rurociągu badawczego [A4]

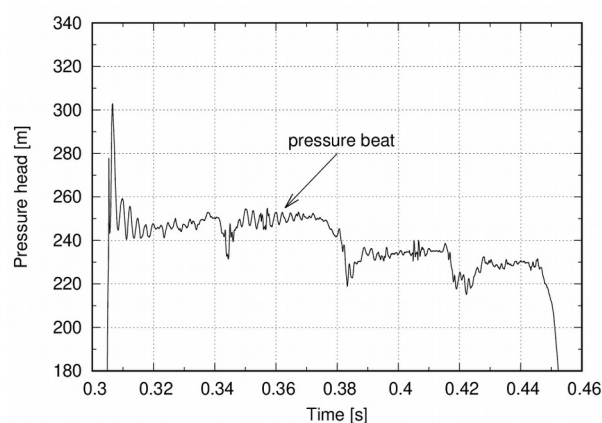


Rys. 4. Przykładowy, zmierzony przebieg ciśnienia przy zaworze w funkcji czasu [A4]

zamieszczono także w [A4]) a na rys. 4 zobrazowano przykładowy przebieg ciśnienia. Na otrzymanych wynikach pomiarów zmian ciśnienia obserwowano jednak efekty, których nie dało się wyjaśnić za pomocą klasycznej teorii UH. Są one widoczne na obwiedni pierwszych kilku pików fali ciśnienia pokazanych na rys. 4. Aby lepiej uwidocznic ich charakter na rys. 5 zobrazowano powiększony fragment podobnego przebiegu (powstałego przy nieco większym wymuszeniu, czyli większej początkowej prędkości przepływu). Widać, że na obwiedni głównej fali UH pojawiają się wysokoczęstotliwościowe (ang. *high frequency* = HF) drgania związane z falą w strukturze. Co więcej, ich kształt jest dodatkowo złożony, gdyż układają



Rys. 5. Zmierzzone oscylacje HF fali PC nałożone na główną falę UH [A4]

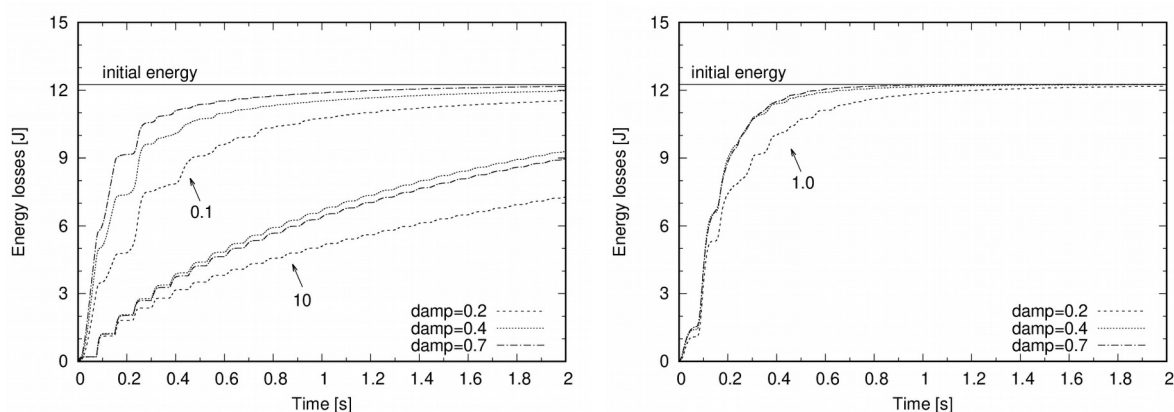


Rys. 6. Przykładowe symulacje numeryczne fali PC nałożone na główną falę UH [A4]

się one w charakterystyczne zafalowania (dudnienia – na rysunku opisane jako ang. *beats*), to jest cztery wolniej zmienne oscylacje. Wykonana analiza i badania numeryczne pokazały, że są one efektem charakteru wymuszenia, określonej struktury rurociągu oraz jego systemu zamocowania. Efekty te omawiano już w pracy [A9], jednak wykonane tam symulacje numeryczne opierały się na założeniu sztywnych WB w węzłach mocowania. Rozszerzoną analizę obejmującą modelowanie podpór lekko-sprężystych wnioskodawca wykonał w pracy [A8] a najdalej idące badania numeryczne – w artykule [A4]. Przeprowadzono tam modelowanie sposobu zamocowania rurociągu w bardzo różnych wariantach, uzyskując niezłą zgodność z wynikami pomiarów. W efekcie wykonanych badań i analiz stwierdzono, że zaobserwowane oscylacje HF są wynikiem fali „strukturalnej” adekwatnie do istniejącego systemu zamocowania i wymuszenia a cztery oscylacje zidentyfikowano jako wynik odbić tej fali na odcinku nawiniętej części rurociągu. Na rys. 6 pokazano przykładowe wyniki dla jednego ze sposobów modelowania, polegającego na założeniu, że nawinięty rurociąg jest swobodny. Dalsza szczegółowa dyskusja i analiza, w tym komentarz co do przeciwnego, średniego kierunku nachylenia przebiegów z rys. 5, 6 zawarto w pracy [A4]. Pokazano w niej też m.in. wpływ czasu zamykania zaworu na charakter zaburzeń HF. Formułowane wnioski pozwoliły też na pozytywną weryfikację prawidłowości i efektywności przyjmowanych modeli oraz wykonanego oprogramowania. W artykule tym przeanalizowano również między innymi wpływ tłumienia w podporach. Jednak dla aktualnego, stosunkowo sztywnego systemu mocowania okazało się, że tłumienie to ma niezauważalny wpływ na amplitudy głównej fali UH, wpływa tylko na redukcję poziomu oscylacji HF.

4.3.3. Numeryczne badania rozpraszania energii w wiskoelastycznych podporach

Aby zbadać wpływ rozpraszania energii w podporach w szerszym zakresie, w tym na amplitudy fali UH autor wykonał symulacje numeryczne dla modelu, w którym układ rurociągowy charakteryzuje się mocowaniem o większej możliwości odkształceń wszystkich podpór. Wstępne wyniki badań dla takiego układu wnioskodawca zaprezentował w referacie konferencyjnym [C4] a rozszerzoną analizę przedstawił w artykule [A4]. W modelu ogólnym przedstawionym na rys. 1 założono więc, że wszystkie podpory mocujące rurociąg są jednakowe i sprężysto-tłumiące co powoduje, że mogą się one znacząco odkształcać a cały rurociąg – przemieszczać. Do modelowania zachowania układu stosowano dwa parametry – względną sztywność mocowania κ oraz stopień tłumienia ξ . Ten pierwszy parametr (κ) wyraża łączną sztywność wszystkich podpór mocujących K odniesioną względem hipotetycznej sztywności k_{WH} mocowania rurociągu z cieczą, jaka powodowałaby, że układ taki potraktowany jak prosty oscylator miałby częstotliwość własną równą podstawowej częstotliwości WH, która dla bieżących warunków brzegowych wynosi $f_{WH}=c/(4L)$. Tak więc $k_{WH}=4\pi^2 f_{WH}^2 M$, gdzie M jest masą rurociągu z wodą. Stopień tłumienia ξ jest standardowo rozumianym parametrem z teorii oscylatora harmonicznego (zwykle jest oznaczany przez ζ a jego wartość krytyczna wynosi 1). Jego związek ze współczynnikiem oporu b (rys. 2) określa równanie $2\xi\omega_0=B/M$, gdzie B jest sumarycznym współczynnikiem oporu wszystkich podpór a ω_0 częstotliwością własną oscylatora ($\omega_0^2=K/M$). Wykonano badania numeryczne dla różnych wartości wprowadzonych parametrów. Zakładano, że UH powstaje w wyniku nagłego zamknięcia zaworu końcowego w rurociągu z przepływem ustalonym wymuszonym przez zbiornik ciśnieniowy. Aby skoncentrować się na badaniu wpływu tłumienia podpór mocujących założono brak tarcia cieczy. Pominęto także zjawisko Poissona ograniczając efekty FSI do sprzężenia w złączach (w miejscu zamkniętego zaworu). Na rys. 7 pokazano wykresy energii rozpraszanej w podporach w funkcji czasu dla różnych sztywności mocowania i tłumienia. W pojedynczej podporze straty obliczano numerycznie jako całkę po



Rys. 7. Rozpraszanie energii UH w podporach sprężystych dla różnego tłumienia (damp) ξ oraz sztywności κ . Diagram lewy $\kappa=0.1$ lub $\kappa=10$, diagram prawy $\kappa=1.0$ [A4]

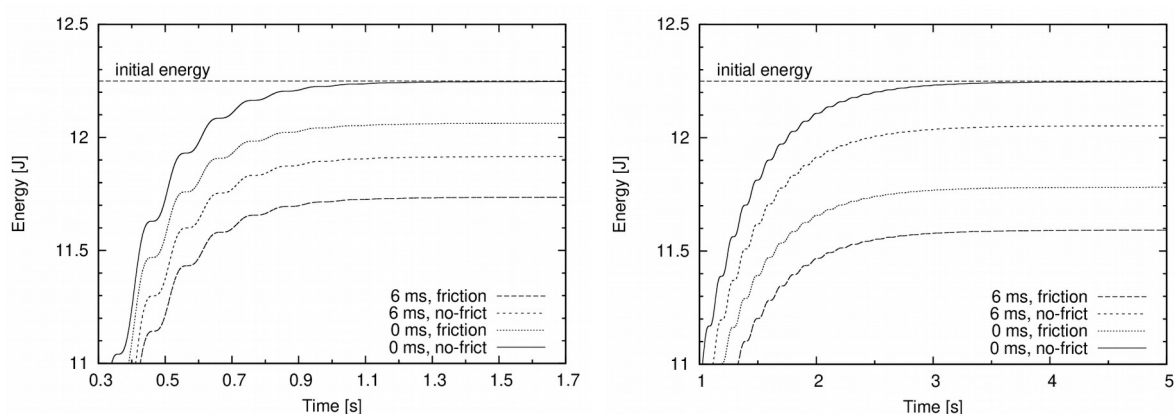
czasie z mocy rozpraszanej w jej tłumiku a energię całkowitą jako sumę strat we wszystkich podporach. Linia poziomą zaznaczono początkową energię układu równą energii kinetycznej cieczy płynącej z prędkością v_0 w stanie początkowym. Widać, że energia rozpraszana dąży

asymptotycznie do tego poziomu co potwierdza poprawność wykonanego modelowania. Można też zauważyć, że szybkość rozpraszanej energii nie zawsze zależy jednoznacznie od tłumienia w podporach i na przykład dla $\kappa=10$ tłumienie przebiega efektywniej przy $\xi=0.4$ niż dla $\xi=0.7$. Jak widać, efekt ten ma miejsce dla stosunkowo dużej sztywności mocowania. Szerszą dyskusję w tym zakresie i analizę uzyskanych wyników, w tym przebiegów czasowych fali ciśnienia, przedstawiono w pracy [A4].

4.3.4. Wpływ sposobu mocowania i zamykania zaworu na przebieg zjawiska

Autor wniosku analizował też specyficzny problem wpływu na przebieg UH sposobu zamocowania zaworu końcowego w rurociągu. Można oczekiwać, że jego elastyczne (wiskoelastyczne) utwierdzenie spowoduje swego rodzaju efekt amortyzujący i może wpływać na ograniczenie negatywnych skutków stanu nieustalonego. Postulat zbadania takiego rozwiązania wysunięto już w klasycznej pozycji literatury [1], choć autorzy nie przedstawili rozwiązań w tym zakresie. Warto zwrócić uwagę, że koncepcja elastycznie zamocowanego zaworu może być zaimplementowana w praktyce, ale może być też modelem innych, równoważnych rozwiązań. Problematykę tę wnioskodawca omawiał szerzej, między innymi w artykułach [A3,A7]. Tutaj, jako jeden z wniosków warto podkreślić, że elastyczne mocowanie rzeczywiście powoduje efekt amortyzujący a dzięki tłumieniu może prowadzić do efektywnej redukcji amplitud UH w czasie. Jednak zbyt duże tłumienie w układzie mocowania zaworu może, w pewnym zakresie, nieść także niekorzystne skutki i powodować przejściowe wzrosty amplitudy ciśnienia w początkowym okresie przebiegu zjawiska.

W prowadzonych badaniach analizowano także wpływ czasu zamykania zaworu. W zakresie długich czasów zamykania łagodzące efekty wywołane powolnym zamykaniem są znane już z klasycznej teorii UH. Dla krótkich czasów stwierdzono natomiast, że wpływa on głównie na charakter efektów FSI, co jest zgodne z ogólną prawidłowością, że wymuszenia o krótkich czasach powodują powstawanie silniejszych wzbudzeń o wysokich częstotliwościach. Efekty te potwierdzono też w symulacjach wykonanych w pracy [A4]. Dla zobrazowania badanych zjawisk związanych z WB w węźle mocowanego wiskoelastycznie zaworu zamykanego w określony sposób przeprowadzono też analizę energetyczną zachodzących zjawisk. Na rys. 8 przedstawiono wykresy energii rozpraszanej w tłumiku w funkcji czasu, dla różnych



Rys. 8. Rozpraszanie energii w tłumiku sprężyny dla różnych czasów zamykania zaworu, z tarciem cieczy lub bez. Diagram lewy $\xi=0.3$, diagram prawy $\xi=0.1$ [A3]

parametrów mocowania zaworu. Stosuje się na nich znormalizowane parametry κ i ξ , zdefiniowane podobnie jak w przypadku rurociągu na elastycznych podporach. Tak więc sztywność k sprężyny odnosi się do modelowej sztywności k_{WH} , M jest masą kolumny wody (masę zaworu pomijamy) a stopień tłumienia wynika ze współczynnika oporu b tłumika mocowania zaworu. Linią poziomą zaznaczono energię początkową układu, czyli energię kinetyczną płynącej, z prędkością v_0 , cieczy w początkowym stanie ustalonym. Widać, że przy braku tarcia o ścianki i natychmiastowym zamknięciu zaworu całe straty energii mają miejsce w tłumiku sprężyny, gdyż odpowiednia krzywa dąży asymptotycznie do poziomu energii początkowej. Jeśli jednak efekty te mają miejsce część energii jest rozpraszana przy przepływie przez zawór (gdy czas zamykania jest niezerowy) lub w procesie tarcia cieczy (gdy nie jest ono pomijane). W artykule [A3] przedstawiono szczegółową analizę ilościową uzyskiwanych wyników, która jest spójna z fizyczną interpretacją zachodzących zjawisk.

4.3.5. Rozwiązanie analityczne UH dla rurociągu z elastycznym zakończeniem

W artykule [A3] wnioskodawca przedstawił też analityczne rozwiązanie modelu omawianego w poprzedniej sekcji przy określonych założeniach upraszczających. Przyjęto mianowicie, że zawór jest zamykany natychmiast (jest również nieważki), pomijano tłumienie w systemie zamocowania zaworu oraz tarcie cieczy o ścianki. Najważniejsze elementy wykonanej analizy można przedstawić w następujący sposób. Układ obowiązuje równań ruchu sprowadzono do równania falowego dla prędkości, które rozwiązano metodą separacji zmiennych dla przyjmowanych warunków granicznych. Kluczowym WB w węźle zaworu (zakłada się, że amplituda drgań zaworu jest nieduża) jest równowaga pomiędzy siłą wywieraną przez ciśnienie cieczy a siłą sprężystości mocowania. Prowadzi to do równania:

$$\left[\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + \gamma^2 \frac{v(x,t)}{L} \right]_{x=L} = 0 \quad (11)$$

Parametr γ ma postać $\gamma = (L/c)(k/M)^{1/2}$. Równanie falowe rozwiązano metodą separacji zmiennych otrzymując rozwiązanie dla prędkości oraz następującą zależność dla ciśnienia:

$$p(x,t) = p_0(x) + \rho c v_0 \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n \sin \theta_n \frac{ct}{L} \sin \theta_n \frac{x}{L} \quad (12)$$

W powyższym równaniu $p_0(x)$ jest rozkładem ciśnienia wzdłuż rurociągu w chwili $t=0$ (dla przyjmowanych założeń ma stałą wartość) a bezwymiarowe amplitudy β_n dane są wzorem:

$$\beta_n = \frac{2 \sin \theta_n}{\theta_n + \sin \theta_n \cos \theta_n} \quad (13)$$

Wartości θ_n są rozwiązaniami poniższego równania charakterystycznego i są prosto związane z częstościami ω_n poszczególnych harmoniczych:

$$\theta \tan \theta = \gamma^2 \quad \omega_n = \theta_n c / L \quad (14)$$

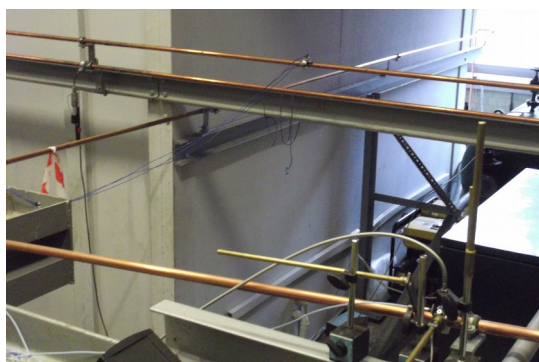
W ogólnym przypadku sumowanie poszczególnych składowych harmoniczych wg wzoru (12) wymagało metod numerycznych. Autor wykonał odpowiedni program komputerowy a wyniki symulacji porównał w wynikami badań numerycznych opisanych w poprzedniej sekcji uzyskując bardzo dobrą zgodność.

Uzyskane rozwiązania analityczne miały znacznie prostszą postać dla pewnych przypadków szczególnych, które warto w skrócie omówić. Gdy sztywność mocowania jest odpowiednio mała, to szereg stanowiący rozwiązanie zadania można ograniczyć do pierwszej (zerowej) harmonicznej, której częstość wynosi $\omega_0 = (k/M)^{1/2}$, a z postaci otrzymanego rozwiązania widać, że amplituda ciśnienia może być znacząco zmniejszona. Dla idealnie sztywnego zamocowania zaworu otrzymujemy natomiast klasyczne rozwiązanie WH w postaci fali prostokątnej, dla której częstotliwości poszczególnych harmonicznych są nieparzystymi wielokrotnościami podstawowej częstotliwości $f_{WH} = c/(4L)$.

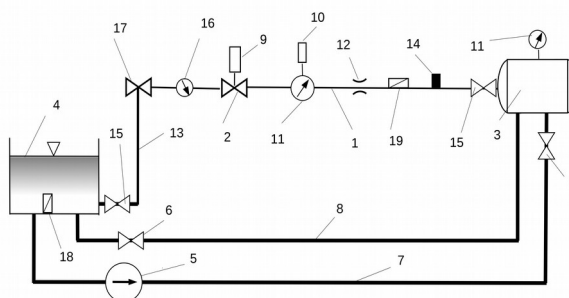
4.4. Własne badania doświadczalne

4.4.1. Stanowisko badawcze i zakres pomiarów

Jednym z zadań realizowanego projektu badawczego własnego N N504 478839 były badania doświadczalne przebiegów UH. Ich celem było między innymi określenie wpływu sposobu elastycznego zamocowania rurociągu na przebieg badanego zjawiska. Zbudowany w celu realizacji tych badań rurociąg laboratoryjny wykonany został z rurki miedzianej o średnicy $D=20\text{mm}$ i grubości ścianek $e=1\text{mm}$ oraz miał długość $L=59\text{m}$. Składał się on z kilkunastu prostoliniowych odcinków połączonych kolanami i był utwierdzony do konstrukcji fundamentowej za pomocą szeregu uchwytów sprężystych. Podstawowy system mocowania i konfiguracji podpór oznaczany literą L charakteryzował się sztywnym utwierdzeniem rurociągu na początku (przy zbiorniku) i na końcu (przy zaworze) oraz dodatkowym zamocowaniem w ustalonych, rozłożonych równomiernie, 24 węzłach wewnętrznych za pomocą stalowych uchwytów sprężystych. Stosowano cztery typy podpór – FS2, FS3, FS4, FSR (uszeregowane wg rosnącej sztywności). Ich wygląd pokazano między innymi w publikacjach [A2,A5], w tej pierwszej omówiono także szczegółowo ich parametry sprężyste. Tym samym w prowadzonych analizach rozpatrywano warianty mocowania L2, L3, L4, LR. Na rys. 9,10 pokazano widok ogólny rurociągu pomiarowego i schemat funkcjonalny układu



Rys. 9. Widok rurociągu badawczego [A5]



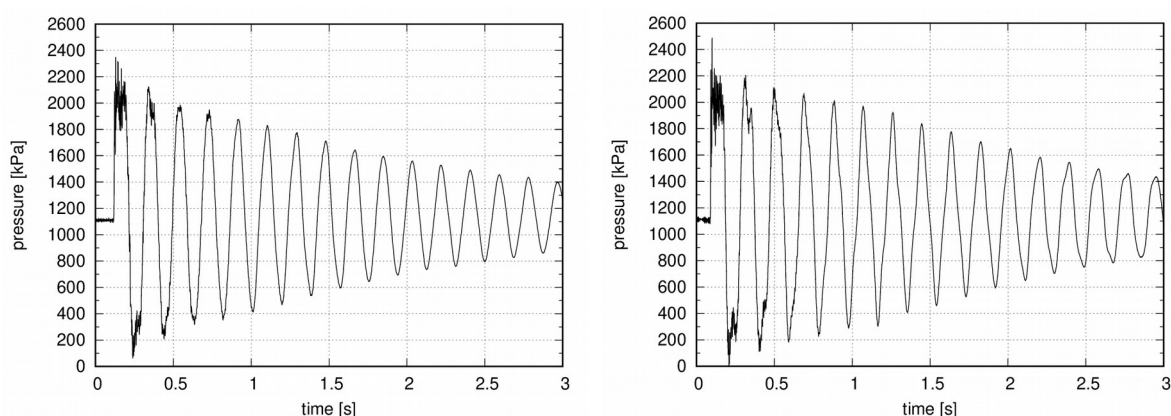
Rys. 10. Schemat funkcjonalny stanowiska laboratoryjnego [A5, A1]

1 - główny rurociąg pomiarowy, 2 - kulowy zawór zamykający, 3 - wodno-powietrzny zbiornik ciśnieniowy, 4 - zbiornik otwarty (końcowy), 5 - pompa, 6 - zawór sterujący, 7/8 - rurociąg zasilający/powrotny, 9 - mechanizm zamykający zawór i miernik kąta otwarcia, 10 - czujnik temperatury, 11 - przetwornik ciśnienia, 12 - miernik prędkości (ultradźwiękowy), 13 - gumowy przewód powrotny, 14 - miernik drgań, 15 - zawór kontrolny, 16 - przepływomierz objętościowy, 17 - zawór regulacyjny, 18 - miernik temperatury, 19 - tensometr oporowy

badawczego. W pracy [A5] zawarto także ogólną dyskusję wykonanych badań i wyników oraz przedstawiono wybrane analizy i wnioski. Zagadnienia te były też przedmiotem wystąpień konferencyjnych [C3,C5] wnioskodawcy. Przeprowadzono dwa typy badań doświadczalnych. Pierwsze obejmowały analizę przebiegów UH wywołanego szybkim odcięciem przepływu. Testowano też stany nieustalone wywołane przez uderzenie w rurociąg specjalnym młotkiem modalnym. Poniżej przedstawiono skrótowe omówienie wyników oraz wniosków z badań i analiz zaprezentowanych w artykule [A5].

4.4.2. Pomiary UH wywołane gwałtownym odcięciem przepływu

Badania tego typu wykonano dla dwóch różnych wartości ciśnienia początkowego p_0 w zbiorniku ciśnieniowym (3), niższe (N) wynosiło nominalnie 0.72 MPa, natomiast wyższe (W) 1.12 MPa. Dla każdego ciśnienia stosowano dziesięć wartości nominalnej początkowej prędkości przepływu w stanie ustalonym, w zakresie od 0.06 m/s do 2.0 m/s. Powtarzalne UH uzyskiwano dzięki sprężynowemu napędowi zaworu końcowego, który był zamykany w czasie 5 ms. Powstałe UH dla mniejszych prędkości początkowych przebiegały bez rozerwania strumienia, dla większych (gdy amplituda ciśnienia WH określona wzorem (1) przekraczała wartość ciśnienia statycznego p_0) występowały efekty dwufazowe. Na rys. 11 przedstawiono przykładowe przebiegi fali ciśnienia przy zaworze końcowym dla warunków W6 (ciśnienie 1.12 MPa, prędkość 0.7 m/s) i konfiguracji mocowania L2 oraz L4. W artykule



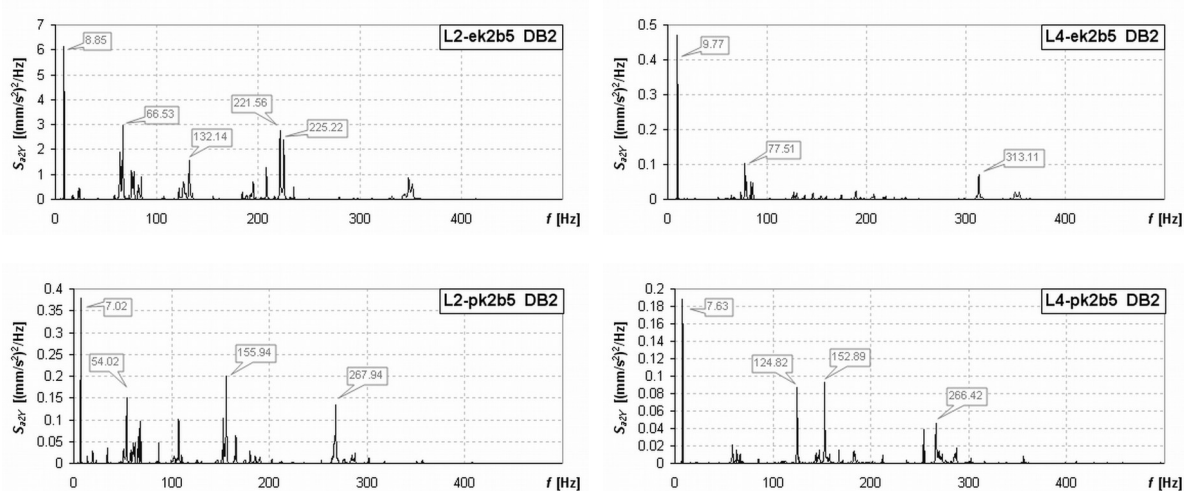
Rys. 11. Oscylacje ciśnienia fali UH przy zaworze dla warunków początkowych W6, konfiguracja podpór L2 (diagram lewy) lub L4 (diagram prawy) [A1]

[A5] pokazano też przebiegi L3 i LR oraz sformułowano główne wnioski w kwestii wpływu sztywności podpór na przebieg fali ciśnienia. Jeden z ważniejszych wniosków stwierdza, że szybciej zanikają oscylacje ciśnienia w układzie z podporami o mniejszej sztywności. Z przedstawionych przebiegów obliczono (15) średnie wartości logarytmicznego dekrementu tłumienia uzyskując wyniki: $\delta_2=0.96$, $\delta_3=0.91$, $\delta_4=0.83$, $\delta_R=0.69$. Interpretacja tego wniosku nie jest w pierwszej chwili oczywista, gdyż zastosowane podpory sprężyste mają pomijalne tłumienie materiałowe a mimo to, różnice w dekrementach są dość znaczne. Wynikają one niewątpliwie z efektów FSI i złożonych mechanizmów transferu lub rozpraszania energii. Wstępnie zaproponowano kilka hipotez dla wyjaśnienia tego faktu [A5], między innymi wzrost strat tarcia cieczy wynikający z większej amplitudy drgań rurociągu. Dalsza, bardziej szczegółowa analiza wydaje się potwierdzać zasadność takiego wniosku [C1], choć możliwe

są też inne przyczyny. Stwierdzono także, że dla mniej sztywnych podpór kształt przebiegu szybciej zmienia się z quasi-prostokątnego na quasi-sinusoidalny co wynika prawdopodobnie z silniejszego tłumienia składowych o wysokich częstotliwościach. Z innych wniosków warto podkreślić, że nie zauważano istotnej różnicy w początkowych wartościach amplitudy fali ciśnienia dla różnych podpór – wynika to zapewne z faktu, że rurociąg przy zaworze jest zamocowany sztywno (nie występuje efekt „amortyzujący”). Silne zaburzenia HF pojawiające się w początkowym okresie przebiegu są zapewne, podobnie jak w przypadku pomiarów omawianych w sekcji 4.2.2, wynikiem silnego wzbudzenia drgań strukturalnych wynikającego z nagłego odcięcia przepływu. Podobne efekty pojawiają się również w przebiegach z rozerwaniem strumienia, w cyklach kiedy dochodzi do implozji pęcherzy kawitacyjnych. Generalnie stwierdzono też, że bardziej elastyczne zamocowanie rurociągu wpływa na złagodzenie efektów wywołanych rozerwaniem strumienia.

4.4.3. Stany przejściowe wymuszone wstrząsem rurociągu

Drugi rodzaj wykonanych badań polegał na wzbudzaniu układu rurociągowego do drgań poprzez uderzenia w jego konstrukcję za pomocą specjalnego młotka modalnego z wymiennymi wkładkami sprężystymi o różnej sztywności oraz obserwacji powstałego stanu przejściowego. Badania takie wykonano dla rurociągu pustego a także napełnionego wodą (stojącą lub z przepływem). Sformułowane, główne wnioski potwierdzają podstawowe założenia i mechanizmy przyjmowane w modelowaniu zjawiska. Widać, że wzbudzenie fali WH jest efektywniejsze przy mniej sztywnym zamocowaniu, co jest zgodne z mechanizmem sprzężenia w złączach. Poza tym potwierdzono, że częstotliwości składowych harmonicznym wygenerowanej fali UH zależą od WB, które były inne dla rurociągu z cieczą bez przepływu (zawór początkowy i końcowy zamknięte) i z przepływem (zawór początkowy otwarty, końcowy prawie zamknięty – przepływ był nieznaczny). Ważne jest również spostrzeżenie, jak zmieniły się częstotliwości podstawowych harmonicznym przy drganiach poprzecznych rurociągu pustego i z wodą. Na rys. 12 przedstawiono widma drgań układu przy mocowaniu L2/L4



Rys. 12. Widma drgań poprzecznych w punkcie B (DB2) wywołanych uderzeniem młotka (wkładka k2, sposób b5) w rurociąg pusty (e) lub z przepływem (p) o mocowaniu L2/L4

L2 i L4 dla dwóch przypadków rurociągu pustego i z płynącą cieczą (bez przepływu jest podobnie). Relacja między podstawowymi częstotliwościami własnymi jest zbliżona, gdyż dla L2 ich stosunek wynosi $8.85/7.02=1.26$ a dla L4, $9.77/7.63=1.28$. Relacja ta jest też zgodna z efektem wnoszonym przez wzrost masy układu. Wynik ten potwierdza słuszność jednego z założeń modelu standardowego, że ciecz w liniowych drganiach poprzecznych traktuje się jako masę dodaną (wzrost masy zmniejsza częstotliwości własne).

4.5. Metoda oceny szkodliwości uderzenia hydraulicznego

4.5.1. Ocena szkodliwości uderzenia hydraulicznego

Ponieważ zjawisko UH jest często efektem niepożądanym ważna jest możliwość oceny szkodliwości narażeń związanych z jego występowaniem. Umożliwiłoby to bardziej jednoznaczną ocenę odporności danego układu na mogące pojawić się zagrożenia, ale także porównywanie różnych przebiegów UH, co w efekcie ułatwiłoby ocenę zastosowanych metod zapobiegania skutkom tego zjawiska. Najprostszym sposobem jest porównanie wielkości amplitud generowanych fal ciśnienia (lub naprężeń w materiale) choć należy zdawać sobie sprawę, że bezwzględna wielkość amplitudy nie jest jedyną miarą szkodliwości zjawiska. Znaczenie ma także kształt przebiegu w czasie. Istotnym czynnikiem jest też tempo zaniku powstałych obciążeń. Rzeczywiste przebiegi UH mogą mieć różny charakter a na ich parametry wpływ ma wiele czynników. Jednym z bardziej znaczących jest dynamiczne oddziaływanie ciecz–konstrukcja, choć też inne efekty będą powodować, że jednoznaczna ocena szkodliwości różnych przebiegów UH może nie być oczywista. W literaturze przedmiotu wnioskodawca nie spotkał się z jednoznacznymi propozycjami metod, które pozwalałyby na ocenę szkodliwości narażeń wywołanych przez UH. W zasadzie można uznać, że niezłym rozwiązaniem byłoby zastosowanie do tego celu analizy widmowej (z użyciem FFT). Podejście takie mogłoby się wydawać naturalne jednak wymaga ono odpowiedniej interpretacji fizycznej uzyskanych wyników. Zdaniem autora wniosku istnieje lepszy sposób oceny narażeń wywołanych przez UH, znany z określonych, specyficznych zastosowań w układach mechanicznych narażonych na obciążenia o charakterze przejściowym (udarowym). Jest to metoda widm odpowiedzi udarowej (ang. *shock response spectrum* = SRS). Wnioskodawca zaproponował tę metodę do oceny szkodliwości narażeń wywołanych przez UH i opisał tę koncepcję w artykule [A1] a w skrócie, poniżej.

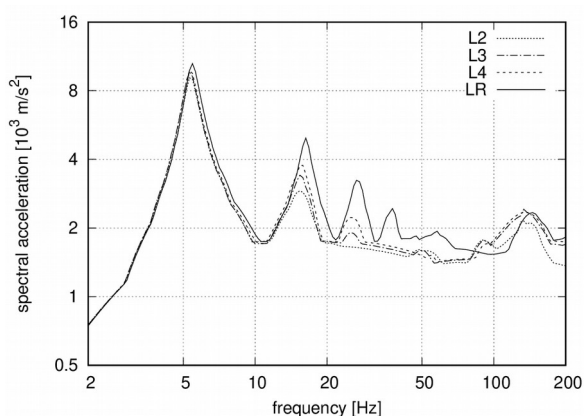
4.5.2. Metoda widm odpowiedzi udarowej i jej implementacja numeryczna

W sprężystych układach mechanicznych charakterystycznym rodzajem obciążeń są wymuszenia o charakterze krótkotrwałym, przejściowym określane jako wstrząsy lub obciążenia udarowe/impulsowe. Naturalną miarą szkodliwości takiego obciążenia może być maksymalna reakcja układu jaką ono generuje. Reakcja ta zależy też od parametrów sprężystych obciążanego układu a w szczególności od jego podstawowej częstości drgań własnych [19,C10,A1]. Jeśli więc za model układu sprężystego przyjmiemy nieważki oscylator harmoniczny o jednym stopniu swobody, to widmem odpowiedzi udarowej SRS danego obciążenia nazywamy maksymalną reakcję tego oscylatora określoną w funkcji jego częstości własnej ω . Zakładamy też z reguły pewien niewielki stopień tłumienia ζ takiego oscylatora. Reakcję tę możemy wyrażać w różny sposób, wykorzystując podstawowe

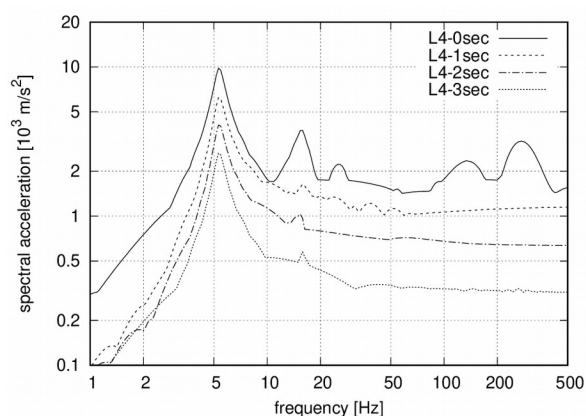
zmienne ruchu oscylatora – przemieszczenie, prędkość lub przyspieszenie, i dla różnych założeń otrzymując różne typy widma. Na ogół interesuje nas maksymalna reakcja całkowita (ang. *overall* lub *maximax*), ale możemy też określać maksymalną reakcję w trakcie trwania impulsu (ang. *initial*) lub po jego zakończeniu (ang. *residual*). Wprowadzamy też pojęcia impulsów długotrwałych i krótkotrwałych. Szersze omówienie metody SRS oraz jej zastosowań autor przedstawił w artykule [A1]. Opisał tam też opracowany sposób obliczania widm SRS, w oparciu o własny algorytm numeryczny dla obciążeń przejściowych o dowolnym kształcie. Omówił także szczegółowo sposób wstępnego przetworzenia sygnału obciążenia wywołanego przez UH w celu obliczenia jego widma SRS. Między innymi, ważnym aspektem był dobór długości czasu trwania przebiegu branego do analizy.

4.5.3. Widma SRS zmierzonych przebiegów UH

Opracowaną metodę autor zastosował do rzeczywistych przebiegów UH zmierzonych podczas własnych badań laboratoryjnych, z których dwa pokazano na rys. 11. Na rys. 13 przedstawiono poziomy widma SRS przebiegów ciśnienia dla warunków granicznych W6 i różnej sztywności mocowania rurociągu. Widać, że łagodniejszych przebiegów (jeśli chodzi o skutki) można oczekiwać dla mocowania rurociągu o mniejszych sztywnościach (nieznaczna zmiana tej prawidłowości dla wysokich częstotliwości ma prawdopodobnie inną przyczynę). Na rys. 14 pokazano tempo zaniku poziomu widma w czasie dla wybranej



Rys. 13. Widma SRS sygnału ciśnienia przy zaworze dla warunków W6 [A1].



Rys. 14. Poziomy widma w czasie, sygnału ciśnienia dla mocowania L4 [A1].

sztywności mocowania (L4). Opierając się na tych danych można obliczyć tempo zmniejszania się amplitud fali UH dla określonej częstotliwości. Do tego celu wykorzystano logarytmiczny dekrement tłumienia (LDT), którego standardową definicję (dla danych czasowych) wyrażono poniżej, równaniem z lewej. Z prawej strony natomiast zaproponowano wzór, który można zastosować do danych widmowych o częstotliwości ν .

$$\delta = \frac{1}{N} \ln \left(\frac{A_0}{A_N} \right) \quad \delta_\nu = \frac{1}{\Delta t \nu} \ln \left(\frac{A(\nu, t)}{A(\nu, t + \Delta t)} \right) \quad (15)$$

Na jego podstawie obliczono wartości dekrementów dla danych widmowych SRS o częstotliwości $\nu = 5.4 \text{ Hz}$ (odpowiada to podstawowej częstotliwości fali WH). Uzyskane

wyniki $\delta_2=0.97$, $\delta_3=0.83$, $\delta_4=0.82$, $\delta_R=0.72$ są w niezłej zgodności z wartościami obliczonymi dla danych czasowych, przedstawionymi w sekcji 4.4.2 i w pracy [A5].

Na podstawie wykonanych analiz uważa się, że proponowana metoda widmowa pozwala w efektywny sposób analizować szkodliwość złożonych obciążeń wywołanych UH. Co prawda, jak widać z rys.13, porównanie dwóch przebiegów może nie być jednoznaczne dla pewnych częstotliwości, to jednak przyczyny takich efektów można odpowiednio wyjaśnić. W pracy [A1] przedyskutowano też różnice i przewagę metody SRS nad klasyczną analizą widmową opartą na FFT. Rozliczne możliwości wynikające ze szczegółowego opisu metody SRS i jej czytelnej interpretacji fizycznej sugerują również możliwość jej zastosowania do modelowania bardziej złożonych wskaźników szkodliwości niż tylko maksymalna reakcja.

4.6. Podsumowanie

Oddziaływanie FSI jest ważnym zjawiskiem w różnych układach mechanicznych. Odgrywa też znaczącą rolę w przebiegu stanów nieustalonych w przepływach cieczy w rurociągach zwłaszcza, gdy układ charakteryzuje się znaczącą elastycznością i wpływ oddziaływania ciecz-struktura jest dynamiczny. Autor wniosku uważa, że proponując oryginalne rozwiązania i uzyskując ważne wyniki, wniósł znaczący wkład w postęp badań naukowych w zakresie WH-FSI, a tym samym w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

Bazując na uznanych podstawach wiedzy zaproponował on efektywną implementację numeryczną modelu podstawowego (4E) WH-FSI oraz opracował oprogramowanie do numerycznych symulacji badanych zjawisk. W przyjmowanych modelach uwzględnił własne koncepcje, rozwiązania oraz opracowane warunki brzegowe. W szczególności sformułował WB w węźle wiskoelastycznego zamocowania rurociągu do fundamentu co umożliwiło także modelowanie rozpraszania energii UH w podporach oraz wpływu tego zjawiska na przebieg WH-FSI. Wskazanie znaczenia efektu strat w podporach rurociągu i propozycja sposobu jego rozwiązania stanowiły, zdaniem autora, istotny wkład w rozwój badań w zakresie WH-FSI. Wykonane symulacje numeryczne potwierdziły efektywność wykonanego oprogramowania. Wnioskodawca opracował też i przedstawił rozwiązanie zagadnienia zaworu mocowanego w sposób wiskoelastyczny. W symulacjach numerycznych zbadał wpływ parametrów sprężysto-tłumiących tego mocowania na reakcje i charakterystyki układu oraz efektywność rozpraszania energii i redukcję amplitud fali ciśnienia UH. Uwzględnił też możliwość i wstępnie przeanalizował wpływ sposobu zamykania zaworu. Dla uproszczonych założeń wyznaczył rozwiązanie analityczne problemu elastycznie mocowanego zaworu. Znaczenie uzyskanych wyników jest istotne również dlatego, że układ taki może być modelem różnych konstrukcji możliwych do realizacji w praktyce.

Autor zaproponował także sposób numerycznego modelowania zjawiska w oparciu o model standardowy, opracowując szereg szczegółowych koncepcji w tym zakresie. W szczególności uogólnił proponowany WB w węźle wiskoelastycznego mocowania rurociągu na przypadek 3D i przedstawił oryginalny sposób jego modyfikacji dla osobliwej macierzy podatności mocowania. Rozwiązał również szczegółny problem określania macierzy podatności specjalnych uchwytów sprężystych stosowanych do mocowania rurociągu doświadczalnego.

Uzyskiwane wyniki były weryfikowane w różny sposób w tym, w oparciu o dostępne rezultaty eksperymentalne. W swoich pracach naukowych autor korzystał z wyników innych

naukowców, ale wykonał też własne badania laboratoryjne, które umożliwiły sformułowanie ważnych wniosków i potwierdziły słuszność wybranych założeń i wyników teoretycznych. Znaczącym i oryginalnym wkładem wnioskodawcy jest też zaproponowanie, do oceny szkodliwości UH specjalnej metody SRS (ang. *shock response spectrum*) oraz opracowanie jej implementacji numerycznej. Przetestował on tę metodę przy wykorzystaniu wyników własnych badań doświadczalnych.

W zaprezentowanym podejściu do zagadnienia WH-FSI wnioskodawca przykładał dużą wagę do problematyki transferów energii oraz jej rozpraszania w wyniku różnych procesów fizycznych. Wykonane badania i analizy potwierdziły znaczącą rolę tych efektów, w tym w szczególności pochłaniania i rozpraszania energii w elementach struktury. Zjawiska te są jedną z głównych przyczyn znaczącego wpływu dynamicznego FSI na przebieg UH w układach rurociągowych o względnie niedużej sztywności.

W swoich pracach autor sformułował i przedyskutował szereg wniosków szczegółowych w zakresie wpływu dynamicznego oddziaływania FSI na przebieg stanów nieustalonych w rurociągach i omówił je w głównym zarysie w niniejszym Autoreferacie. Wnioski te pokazały też istotne znaczenie praktyczne osiągniętych wyników badań oraz możliwości i perspektywy dalszych prac w tej dziedzinie. Możliwości te wynikają także z faktu, że modele rozszerzonej teorii UH mogą być stosowane do opisu różnych zagadnień rzeczywistych.

4.7. Literatura

Publikacje wnioskodawcy wyszczególnione są w „Wykazie osiągnięć naukowych”. W celu pełniejszego scharakteryzowania przedmiotowej tematyki badań poniżej przywołano też wybrane publikacje innych autorów.

1. Wylie E.B., Streeter V.L., 1993, *Fluid transients in systems*, Prentice-Hall, NJ.
2. Adamkowski A., 2013, *Przepływy nieustalone cieczy w przewodach zamkniętych*, Wydawnictwo IMP PAN, Maszyny Przepływowe, tom 34, Gdańsk.
3. Aluastruey J., Parker K.H., Sherwin S.J., 2012, Arterial pulse wave haemodynamics, *Proceedings 11th Conference Pressure Surges*, Lisbon, 401-434.
4. Kanyanta V., Ivankovic A., Karac A., 2009, Validation of fluid-structure interaction numerical model for predicting flow transients in arteries, *J BIOMECH* 42, 1705-1712.
5. Rup K., Drózd A., 2014, Numerical modeling of the pulse wave propagation in large blood vessels based on liquid and wall interaction, *J PHYS CONF SER* 530 012010.
6. Sciamarella D., Artana G., 2009, A water hammer analysis of pressure and flow in the voice production system, *SPEECH COMMUN* 51, 344-351.
7. Tijsseling A.S., Lavooij C.S.W., 1990, Waterhammer with fluid-structure interaction, *APPL SCI RES*, 47, 273-285.
8. Wang Z.M., Tan S.K., 1997, Coupled analysis of fluid transient and structural dynamic responses of a pipeline system, *J HYDRAUL RES* 35 (1), 119-131.
9. Wiggert D., Tijsseling A., 2001, Fluid transients and fluid-structure interaction in flexible liquid-filled piping, *APPL MECH REV* 54, 455-481.
10. Heinsbroek A.G., 1997, Fluid – structure interaction in non-rigid pipeline systems, *NUCL ENG DES*, 172, 123-135.

-
11. Wiggert D.C., Otwell R.S., Hatfield F.J., 1985, The effect of elbow restraint on pressure transients, *J FLUID ENG-T ASME* 107 (9), 403-406.
 12. Wiggert D.C., Hatfield F.J., Stuckenbruck S., 1987, Analysis of liquid and structural transients in piping by the method of characteristics, *J FLUID ENG-T ASME* 109, 161-165.
 13. Budny D.D., Hatfield F.J., Wiggert D.C., 1990, An experimental study on the influence of structural damping on internal fluid pressure during a transient flow, *J PRESS VESS-T ASME*, 112 (8), 284-290.
 14. Budny D.D., Wiggert D.C., Hatfield F.J., 1991, The influence of structural damping on internal pressure during a transient pipe flow, *J FLUID ENG-T ASME*, 113 (9), 424-429.
 15. Zhang L., Tijsseling A.S., Vardy A.E., 1999, FSI analysis of liquid filled pipes, *J SOUND VIB* 224, 69-99.
 16. Tijsseling A.S., 1996, Fluid-structure interaction in liquid-filled pipe systems: a review, *J FLUID STRUCT* 10, 109-146.
 17. Heinsbroek A.G.T.J., Tijsseling A.S., 1994, The influence of support rigidity on water hammer pressures and pipe stresses, *Proceedings 2nd BHR Group International Conference Water Pipeline Systems*, Edinburgh UK, 17-30.
 18. Zanganeh R., Ahmadi A., Keramat A., 2015, Fluid-structure interaction with viscoelastic supports during waterhammer in a pipeline, *J FLUID STRUCT* 54, 215-234.
 19. Snowdon J.C., 1968, *Vibration and shock in damped mechanical systems*, John Wiley and Sons Inc., New York.
 20. Vitkovsky J.P., Bergant A., Simpson A.R., Lambert M.F., 2006, Systematic evaluation of one-dimensional unsteady friction models in simple pipelines, *J HYDRAUL ENG-ASCE* (July) 696-708.
 21. Adamkowski A., Lewandowski M., 2006, Experimental examination of unsteady friction models for transient pipe flow simulation, *J FLUID ENG-T ASME* 128 (11), 1351-1363.
 22. Lewandowski M., 2008, *Modele tarcia w analizie zjawiska uderzenia hydraulicznego*, rozprawa doktorska, IMP PAN, Gdańsk.
 23. Zarzycki Z., Kudźma S., Urbanowicz K., 2011, Improved method for simulating transients of turbulent pipe flow, *J THEOR APPL MECH* 49 (1), 135-158.
 24. Urbanowicz K., 2018, Fast and accurate modelling of frictional transient pipe flow, *ZAMM-Z ANGEW MATH ME*, 98 (5), 802-823.
 25. Soares A.K., Covas D.I.C., Reis L.F.R., 2008, Analysis of PVC pipe-wall viscoelasticity during water hammer, *J HYDRAUL ENG* (Sept.), 1389-1394.
 26. Keramat A., Tijsseling A.S., Hou Q., Ahmadi A., 2012, Fluid-structure interaction with pipe-wall viscoelasticity during water hammer, *J FLUID STRUCT* 28, pp. 434-455.
 27. Mitosek M., Szymkiewicz R., 2012, Wave damping and smoothing in the unsteady pipe flow, *J HYDRAUL ENG* 138 (7), 619-628.
 28. Hutchinson J.R., 2001, Shear coefficients for Timoshenko beam theory, *J APPL MECH*, vol. 68 (1), 87-92.
-

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej

Studia na Politechnice Gdańskiej, w zakresie Fizyki Technicznej ukończyłem w specjalności Fizyka Ciała Stałego a moja praca magisterska poświęcona była badaniom właściwości elektrycznych półprzewodnikowych szkieł fosforanowo-wanadowych [D11].

5.1. Działalność naukowa w Wyższej Szkole Morskiej

W krótkim okresie pracy w Wyższej Szkole Morskiej (obecnie Uniwersytet Morski) w Gdyni, poza wdrażaniem się do działalności dydaktycznej, zajmowałem się problemami zanieczyszczeń wody morskiej (głównie związkami ropopochodnymi). Przygotowałem i wygłosiłem jeden referat na ten temat na międzyuczelnianym seminarium w Zakładzie Biofizyki Akademii Medycznej (obecnie Uniwersytet Medyczny) w Gdańsku.

5.2. Działalność naukowa w OBR Centrum Techniki Morskiej przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych

W OBR Centrum Techniki Morskiej (CTM) zajmowałem się zagadnieniami drgań, szumów podwodnych i hałasów generowanych na statkach, głównie okrętach Marynarki Wojennej (MW) a także metodami minimalizacji tych zjawisk. Drugim znaczącym kierunkiem badań były metody oceny obciążeń udarowych (impulsowych) wywołanych falą uderzeniową od wybuchu niekontaktowej miny podwodnej. Zagadnienia te obejmowały też metody ochrony urządzeń okrętowych przed skutkami tych zjawisk, za pomocą projektowanych systemów zamocowania. Opracowałem metodę i wykonałem badania właściwości sprężysto-tłumiących wariantów specjalnego tworzywa sztucznego do pokrywania kadłuba, którego celem było tłumienie jego drgań a efekty tych prac przedstawiane były na konferencjach naukowych [D10]. Zajmowałem się projektowaniem i badaniami amortyzatorów do mocowania urządzeń [D2,D3,D6,D7,D9] oraz układów posadowienia mechanizmów w celu uzyskania optymalnych efektów redukcji obciążeń [D5,D7,D8,D9]. Byłem współautorem wynalazku – specjalnego amortyzatora (patent nr 170996) przeznaczonego do tych celów. Razem z zespołem prowadziliśmy także różne prace aplikacyjne w powyższym zakresie na rzecz MW i Stoczni MW w Gdyni. W ramach działania akredytowanego Laboratorium Badawczego OBR CTM opracowałem i nadzorowałem procedurę badawczą w zakresie odporności i wytrzymałości urządzeń na obciążenia impulsowe (udarowe) zgodnie z zakładanymi wymaganiami i obowiązującymi normami.

Zajmowałem się także zagadnieniami modelowania numerycznego badanych zjawisk, opracowując własne programy komputerowe wykorzystywane do prowadzonych badań oraz obliczeń projektowych. Wykonałem między innymi program do modelowania i obliczania reakcji na różne obciążenia oraz modelowania charakterystyk okrętowych układów amortyzacyjnych o wielu stopniach swobody z wykorzystaniem stosowanych elementów sprężystych, omawiany m.in. w pracach [D1,D5]. Zaproponowałem sposób rozwiązania zagadnienia oddziaływania fali ciśnienia (uderzeniowej) wywołanej wybuchem podwodnym (przy założeniu sztywnego kadłuba okrętu) ze szczegółowym uwzględnieniem kształtu

kadłuba [D1,D4]. Opracowałem algorytmy i program komputerowy do takich symulacji. Powyższa tematyka badań była przedmiotem mojej pracy doktorskiej [D1].

5.3. Aktywność naukowa związana z realizacją przewodu doktorskiego w Akademii Marynarki Wojennej

Przez okres około dwóch lat (1995-1997), jako pracownik OBR CTM, realizowałem przewód doktorski na Wydziale Mechaniczno-Elektrycznym Akademii Marynarki Wojennej (AMW) w Gdyni. Poza standardowym zakresem zaangażowania i współpracy naukowej wynikającej z tego faktu jak konsultacje czy seminaria, wykonałem też, wspólnie z pracownikami naukowymi AMW, pewne prace doświadczalne. Dotyczyły one badania charakterystyk quasi-statycznych specjalnych amortyzatorów linowych a uzyskane wyniki opisałem między innymi w mojej rozprawie doktorskiej (rozdz. 5.1.4). W swoich pracach [D4] korzystałem też z innych wyników opublikowanych badań prowadzonych w AMW.

5.4. Działalność naukowa w OBR Centrum Techniki Morskiej po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora zakres prac realizowanych w OBR CTM uległ rozszerzeniu o nowe zagadnienia, związane z realizacją dużego projektu pod nazwą KRYL (etap B+R i wdrożenie), realizowanego w latach 1999-2003. Jego celem było opracowanie i zbudowanie systemu monitorowania, nadzoru i ochrony baz morskich oraz portów przed zagrożeniami (między innymi terrorystycznymi). Jednym z jego elementów był podsystem KRYL-B, czyli pasywny, hydroakustyczny system do rejestracji i przetwarzania sygnałów oraz wykrywania i lokalizacji źródeł szumów podwodnych – okrętów (głównie w aspekcie okrętów podwodnych). Byłem członkiem kilkusobowego zespołu realizującego tę pracę i jednym z głównych autorów ogólnej koncepcji konstrukcji tego systemu. Opracowałem projekt układu przetworników hydroakustycznych oraz metodykę nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów obejmujących między innymi algorytm MUSIC (ang. *multiple signal classification*). W tym celu pozyskałem niezbędną wiedzę teoretyczną opartą w dużej mierze na publikacjach w czasopiśmie naukowych z tej dziedziny (m.in. *IEEE Transactions on Signal Processing*) i zaimplementowałem ją w praktyce, wprowadzając przy tym własne rozwiązania i koncepcje. Opracowałem algorytmy i programy komputerowe realizujące wymagane obliczenia oraz przetwarzanie sygnałów. Algorytmy te zostały też zaimplementowane i uruchomione na systemie zaprojektowanym i zbudowanym przez nasz zespół. Składał się on z układu hydrofonów, podwodnego modułu elektronicznego do akwizycji i wstępnego przetwarzania sygnałów, układu transmisji oraz konsoli końcowej do obliczeń, przetwarzania sygnałów (w czasie rzeczywistym) i zobrazowania. Po uruchomieniu był on testowany w praktyce a wyniki tych badań oraz innych prac, w tym proponowane przeze mnie rozwiązania, koncepcje oraz implementacje metod przetwarzania sygnałów, były przedmiotem wykonanych publikacji [B10-B14, C11-C25]. Uważam, że moje dokonania w zakresie w/w tematyki miały znaczący charakter.

Po obronie pracy doktorskiej, realizowałem również, choć już nie w tak szerokim zakresie, prace o tematyce omawianej w sekcji 5.2. W szczególności nadzorowałem w ramach Laboratorium Badawczego CTM procedurę badawczą w zakresie odporności udarowej

urządzeń i prowadziłem niezbędne badania w tym zakresie. Uczestniczyłem też w pracach zespołu opracowującego i wdrażającego zmiany w normach obronnych w zakresie wymagań odporności uderowej dla urządzeń okrętowych. Brałem udział w seminarium poświęconemu tym problemom zorganizowanemu w Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku (2005 rok). Wykonałem też analizę i opiniowanie propozycji norm obronnych NATO w zakresie wymagań odporności uderowej urządzeń okrętowych.

W całym okresie pracy w OBR CTM, poza publikacjami wyszczególnionymi w Wykazie osiągnięć naukowych byłem autorem lub współautorem około 60 opracowań wewnętrznych o charakterze naukowo-badawczym lub technicznym. Byłem wyróżniającym się pracownikiem a w dowód uznania moich osiągnięć otrzymałem w 2002 roku Brązowy Medal MON „Za zasługi dla obronności kraju” oraz Odznakę Honorową OBR CTM (załącznik 6).

5.5. Aktywność naukowa w OBR Centrum Techniki Morskiej związana ze współpracą zagraniczną

W latach 2000-2003 uczestniczyłem, jako jedna z dwóch osób z CTM (także z Polski), w pracach grupy naukowo-technologicznej NATO – SET Panel RTO TG-25 (Sensors and Electronic Technology, Research & Technology Organization, Task Group 25) prowadzącej działalność w zakresie: „Advanced Concepts of Acoustic and Seismic Technology for Military Applications”. W pracach tego zespołu udział brali przedstawiciele różnych państw NATO działający w instytucjach prowadzących prace naukowo-badawcze w dziedzinie obronności (m.in. przedstawiciele wybranych uniwersytetów). Informację na temat naszego udziału w tej organizacji można potwierdzić w prezentacji dr. inż. Jerzego Pietraszińskiego (slajd 23), pt.: „Udział przedstawicieli Polski w SET Panel RTO NATO (Sensors and Electronic Technology)”, Wojskowa Akademia Techniczna, marzec 2006 (dostępna w sieci: <https://www.slideserve.com/montgomery/research-technology-organization-rto>). W ramach tej działalności brałem udział w dwóch jednodniowych roboczych spotkaniach naukowo-technicznych. Pierwsze odbyło się w październiku 2000 roku w Fort Benning/Columbus (Georgia), USA. Drugie warsztaty miały miejsce we wrześniu 2001 w Hadze. Wygłosiłem tam referat na temat wybranych badań prowadzonych w OBR CTM związanych z pasywnymi metodami lokalizacji źródeł szumów (hydro)akustycznych.

W listopadzie 2003 uczestniczyłem (w dwuosobowym zespole z CTM) w tygodniowym pobycie naukowym w Instytucie Badawczym NATO Undersea Research Centre (NURC) w La Spezia (Włochy), gdzie zapoznaliśmy się z badaniami prowadzonymi przez NURC oraz prowadziliśmy konsultacje naukowe w zakresie prac realizowanych w OBR CTM. Uczestniczyłem też dwukrotnie (załącznik 7) w międzynarodowych konferencjach z cyklu UDT Europe (Undersea Defence Technology), gdzie przedstawiłem referaty [C15,C19] związane z prowadzonymi badaniami. Prowadziłem też konsultacje naukowo-techniczne w ramach towarzyszących tym konferencjom wystaw. W tym okresie (2000-2005) brałem też okazjonalnie udział w spotkaniach z przedstawicielami zagranicznych organizacji/ośrodków zainteresowanych współpracą i prezentowałem nasze dokonania, opracowania i możliwości.

Moja aktywność międzynarodowa i osiągnięcia w tym okresie musiały zostać dostrzeżone na świecie i docenione, gdyż w marcu 2005 roku otrzymałem propozycję umieszczenia mojego biogramu w wydawnictwie Marquis „Who is who in the world” (załącznik 6).

5.6. Działalność naukowa w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN

Po zatrudnieniu w IMP PAN w 2008 roku moim głównym tematem badań naukowych stały się zagadnienia przepływów nieustalonych w rurociągach ze szczególnym uwzględnieniem wpływu na to zjawisko dynamicznego oddziaływania ciecz – struktura, czyli tematyka będąca przedmiotem niniejszego wniosku habilitacyjnego. Moje dokonania i osiągnięcia w tym zakresie omówione są w sekcji 4 niniejszego Autoreferatu i opisane bardziej szczegółowo w moich publikacjach. Jednym z elementów prowadzonych prac było pozyskanie i realizacja (jako kierownik) projektu badawczego własnego nr N N504 478839 pt.: „Badania wpływu dynamicznego oddziaływania ciecz-struktura na przebieg uderzenia hydraulicznego”. Poza tym kilkakrotnie brałem udział w badaniach i pracach prowadzonych przez zespół Zakładu Hydroenergetyki, pod kierownictwem prof. A. Adamkowskiego, na rzecz elektrowni wodnych. Wykonywałem także, w miarę potrzeb, inne zadania i prace. W dotychczasowym okresie działalności w IMP PAN byłem autorem (lub współautorem) około 40 opracowań wewnętrznych, na ogół o charakterze naukowo-badawczym (niekiedy technicznym). Obejmowały one przede wszystkim zagadnienia związane z tematyką niniejszego wniosku habilitacyjnego i były realizowane głównie w ramach działalności statutowej oraz w/w projektu badawczego własnego.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych, popularyzujących naukę lub sztukę oraz innych

Moje główne osiągnięcie organizacyjne w zakresie bieżącej działalności naukowej wiązało się ze wspomnianym projektem badawczym Nr N N504 478839. Przygotowałem i złożyłem wniosek, który uzyskał akceptację a następnie kierowałem przyznanym projektem, zarówno od strony merytorycznej jak i organizacyjnej. Projekt został ukończony w 2015 roku a jego sprawozdanie przyjęte. Za znaczące osiągnięcie organizacyjne (od strony merytorycznej) uważam też, w okresie pracy w CTM, udział w projekcie KRYL, o czym piszę w sekcji 5.4. Także nadzór nad procedurą badawczą, realizowany w ramach Laboratorium Badawczego OBR CTM wymagał zaangażowania organizacyjnego. W 2000 roku ukończyłem też, organizowane w CTM szkolenie w zakresie zarządzania projektami.

Z racji charakteru prowadzonej działalności naukowej nie miałem do czynienia ze standardową aktywnością dydaktyczną. Z formalnego punktu widzenia ograniczała się ona do krótkiego okresu pracy w Wyższej Szkole Morskiej w Gdyni jako asystent-stażysta w Instytucie Matematyki, Fizyki i Chemii, gdzie wdrażałem się do działalności dydaktycznej w zakresie fizyki, chociaż nie prowadziłem zajęć samodzielnie. Do mojego doświadczenia dydaktycznego można też zaliczyć udział jako prelegent w konferencjach i sympozjach (po doktoracie ponad 20 razy – w tym połowa po angielsku) oraz seminariach naukowych, a okazjonalnie także inne aktywności. Osiągnięcia dydaktyczne, ale też organizacyjne oraz obejmujące działalność na rzecz społeczności lokalnych, w tym także w sferze edukacji, wiązały się również z moimi zainteresowaniami pozazawodowymi.

Moim ważnym hobby od wielu lat jest brydż sportowy. Jestem członkiem Polskiego Związku Brydża Sportowego (PZBS) i zawodnikiem o znaczących osiągnięciach. Posiadam także uprawnienia instruktora sportu w zakresie brydża a za zasługi w upowszechnianiu i rozwoju

brydża sportowego (w tym dydaktyczne) otrzymałem w 2012 roku Brązową Odznakę PZBS. W latach 2006-2007, jako wolontariusz prowadziłem zajęcia z brydża na Uniwersytecie Trzeciego Wieku w Gdyni (załącznik 9). W ramach projektu współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, realizowanego przez Pomorski WZBS w latach 2009-2011, pt.: „Brydż kluczem do sukcesu – program rozwoju umiejętności kluczowych poprzez naukę brydża sportowego” opracowałem program i przeprowadziłem szkolenie nauczycieli w zakresie brydża, w celu jego nauki w szkołach.



PODPIS ZAUFANY

SŁAWOMIR
HENCLIK

29.11.2022 14:59:23 [GMT+1]

Dokument podpisany elektronicznie
podpisem zaufanym

.....

(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

- 1/ kopie oświadczeń autorów o merytorycznym zakresie pracy w artykułach A2, A5, A9 oraz informacja określająca ilościowy wkład pracy autorów w tych publikacjach;
 - 2/ kopie dokumentów potwierdzających przyznanie i pomyślną realizację grantu N N504 478839;
 - 3/ kopia pierwszej strony opisu patentowego nr 170996;
 - 4/ kopia dokumentu potwierdzającego zatrudnienie w Wyższej Szkole Morskiej w Gdyni;
 - 5/ kopia opinii przełożonego, w tym ogólna informacja o pracy w OBR Centrum Techniki Morskiej;
 - 6/ kopie dokumentów potwierdzających uznanie i wyróżnienia w okresie pracy w OBR CTM:
Brązowy Medal MON „Za zasługi dla obronności kraju”, Odznaka Honorowa OBR CTM,
propozycja umieszczenia biogramu w wydawnictwie Marquis „Who is who in the world”;
 - 7/ informacja o udziale jako autor w konferencjach z cyklu UDT Europe w 2001 (7a) i 2002 (7b) roku;
 - 8/ przykładowa publikacja związana z wcześniejszą działalnością naukową wnioskodawcy, o której mowa w sekcji 5.4 Autoreferatu – artykuł B12;
 - 9/ kopia dokumentu potwierdzającego zaangażowanie pozazawodowe autora wniosku – podziękowanie za prowadzenie zajęć jako wolontariusz na rzecz seniorów z UTW w Gdyni;
- A/kopie publikacji składających się na osiągnięcie naukowe wnioskodawcy wyszczególnionych w sekcji 1 Wykazu osiągnięć naukowych (publikacje A1-A10).