

Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Lądowa,
Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

za pośrednictwem:

Rady Doskonałości Naukowej

pl. Defilad 1

00-901 Warszawa

(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

Michał Kubrak
Politechnika Warszawska
Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska
Zakład Budownictwa Wodnego i Hydrauliki

Wniosek

z dnia 28 listopada 2024 r.

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie **nauk inżynieryjno-technicznych** w dyscyplinie **Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport**.

Osiągnięcie naukowe będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego:

Cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych pt.

Modelowanie uderzenia hydraulicznego w rurociągach.

Wniosuję – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – aby komisja habilitacyjna podejmowała uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu ~~tajnym~~/**jawnym***¹

Zostałem poinformowany, że:

Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).

Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl, tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu. Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c) Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art. 232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.

Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html

.....
(podpis wnioskodawcy)

¹ * Niepotrzebne skreślić.

Spis załączników:

- Załącznik 1 Dane wnioskodawcy
- Załącznik 2 Skan odpisu dyplomu nadania stopnia doktora nauk technicznych
- Załącznik 3 Autoreferat
- Załącznik 4 Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny
- Załącznik 5 Oświadczenia współautorów o merytorycznym wkładzie w powstanie prac zbiorowych wchodzących w skład cyklu powiązanych tematycznie artykułów
- Załącznik 6 Publikacje wchodzące w skład cyklu powiązanych tematycznie artykułów w wersji elektronicznej (numeracja zgodna z wymienianą kolejnością w Autoreferacie w p. 4.2)
- Załącznik 7 Wersja elektroniczna wniosku (pendrive)

Załącznik 3

Autoreferat

Spis treści

1.	Imię i nazwisko _____	3
2.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, rok jego uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej _____	3
3.	Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych _____	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 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) _____	4
4.1	Tytuł osiągnięcia naukowego _____	4
4.2	Forma osiągnięcia naukowego _____	4
4.3	Opis osiągnięcia naukowego _____	5
4.3.1	Wstęp _____	5
4.3.2	Przegląd stanu wiedzy _____	6
4.3.3	Cel osiągnięcia naukowego _____	9
4.3.4	Symulacje uderzenia hydraulicznego w rurociągach o zmiennej średnicy z wykorzystaniem schematu MacCormack’a _____	10
4.3.5	Wykorzystanie polimerowych boczników do tłumienia fal ciśnienia _____	11
4.3.6	Wykorzystanie wstawek polimerowych do tłumienia fal ciśnienia _____	13
4.3.7	Wykorzystanie wewnętrznych przewodów elastycznych do tłumienia fal ciśnienia _____	14
4.3.8	Wpływ zainstalowania V-portu na zasuwie na oscylacje ciśnienia wywołane jej zamknięciem _____	15
4.3.9	Uderzenie hydrauliczne w wężu strażackim _____	16
4.3.10	Podsumowanie _____	17
5.	Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej _____	18
6.	Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę _____	19
6.1	Działalność dydaktyczna _____	19
6.2	Działalność organizacyjna _____	20
6.3	Działalność popularyzująca naukę _____	20
7.	Inne istotne informacje _____	21
7.1	Inne działania naukowe _____	21
7.2	Nagrody i wyróżnienia _____	22
7.3	Działalność recenzencka _____	23
7.4	Działalność doradcza _____	23
7.5	Dane naukometyczne _____	24
8.	Spis literatury przywołanej w autoreferacie _____	25

1. Imię i nazwisko

Michał Kubrak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, rok jego uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

1) Tytuł zawodowy: **inżynier**, 2013 r.

Podmiot nadający tytuł: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska. Kierunek: Inżynieria Środowiska, specjalność: Inżynieria Sanitarna i Wodna.

2) Tytuł zawodowy: **magister inżynier**, 2014 r.

Podmiot nadający tytuł: Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska. Kierunek: Inżynieria Środowiska, specjalność: Inżynieria Wodna.

3) Stopień naukowy: **doktor nauk technicznych** nadany z wyróżnieniem w zakresie inżynierii środowiska w specjalności Hydraulika, 2018 r.

Podmiot nadający stopień: Politechnika Warszawska, Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska.

Tytuł rozprawy: „Ciśnieniowy przepływ wody w rurociągu z umieszczonym wewnątrz przewodem”. Promotor główny: prof. dr hab. inż. Marek Mitosek, promotor pomocniczy: dr hab. inż. Apoloniusz Kodura, prof. uczelni.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

2014 r. – 2018 r. asystent badawczo-dydaktyczny w Zakładzie Budownictwa Wodnego i Hydrauliki na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej;

2017 r. – 2019 r. specjalista ds. inżynieryjno-technicznych w Zakładzie Inżynierii i Gospodarki Wodnej Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach;

2018 r. – obecnie adiunkt w Zakładzie Budownictwa Wodnego i Hydrauliki na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

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 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Modelowanie uderzenia hydraulicznego w rurociągach.

4.2 Forma osiągnięcia naukowego

Podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego jest cykl siedmiu, powiązanych tematycznie, artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach posiadających wskaźnik Impact Factor i indeksowanych przez główne bazy naukowe. Wszystkie czasopisma, w których opublikowano artykuły znajdują się w wykazie MNiSW czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych. Artykuły wchodzące w skład cyklu zestawiono poniżej według daty publikacji. Dla każdej pozycji podano aktualny Impact Factor oraz liczbę punktów wg wykazu MNiSW, który obowiązywał w roku opublikowania artykułu. Dwa z omawianych artykułów są przygotowane samodzielnie, zaś pozostałe pięć publikacji jest współautorskich, lecz z przeważającym moim udziałem. Do opisu artykułów współautorskich załączyłem informację o merytorycznym i szacunkowym procentowym wkładzie własnym.

[A1] Malesińska, A.; **Kubrak, M.**; Rogulski, M.; Puntorieri, P.; Fiamma, V.; Barbaro, G. Water Hammer Simulation in a Steel Pipeline System with a Sudden Cross-Section Change. Journal of Fluids Engineering 2021, doi:10.1115/1.4050728.

Impact Factor: **1,9**; Punktacja MNiSW w 2021 r.: **100 p.**

Wkład: opracowanie algorytmu, wykonanie oprogramowania i przeprowadzenie obliczeń numerycznych, analiza danych, przygotowanie i rewizja manuskryptu; **40%**.

[A2] **Kubrak, M.**; Malesińska, A.; Kodura, A.; Urbanowicz, K.; Stosiak, M. Hydraulic Transients in Viscoelastic Pipeline System with Sudden Cross-Section Changes. Energies 2021, 14, 4071, doi:10.3390/en14144071.

Impact Factor: **3,0**; Punktacja MNiSW w 2021 r.: **140 p.**

Wkład: opracowanie koncepcji badań, opracowanie algorytmu, wykonanie oprogramowania i przeprowadzenie obliczeń numerycznych, analiza danych, przygotowanie i rewizja manuskryptu; **60%**.

[A3] **Kubrak, M.**; Malesińska, A.; Kodura, A.; Urbanowicz, K.; Bury, P.; Stosiak, M. Water Hammer Control Using Additional Branched HDPE Pipe. Energies 2021, 14, 8008, doi:10.3390/en14238008.

Impact Factor: **3,0**; Punktacja MNiSW w 2021 r.: **140 p.**

Wkład: opracowanie koncepcji badań, pozyskanie środków na badania, projekt stanowiska i wykonanie pomiarów hydraulicznych, opracowanie algorytmu, wykonanie

oprogramowania i przeprowadzenie obliczeń numerycznych, analiza danych, przygotowanie i rewizja manuskryptu; **70%**.

[A4] **Kubrak, M.**; Kodura, A.; Malesińska, A.; Urbanowicz, K. Water Hammer in Steel–Plastic Pipes Connected in Series. *Water* 2022, 14, 3107, doi:10.3390/w14193107.

Impact Factor: **3,0**; Punktacja MNiSW w 2022 r.: **100 p**.

Wkład: opracowanie koncepcji badań, pozyskanie środków na badania, projekt stanowiska i wykonanie pomiarów hydraulicznych, opracowanie algorytmu, wykonanie oprogramowania i przeprowadzenie obliczeń numerycznych, analiza danych, przygotowanie i rewizja manuskryptu; **80%**.

[A5] **Kubrak, M.** Water hammer mitigation by internal rubber hose. *Archives of Civil Engineering* 2024, 275–288, doi:10.24425/ace.2024.148911.

Impact Factor: **1,1**; Punktacja MNiSW w 2024 r.: **100 p**.

Wkład: **100%**.

[A6] **Kubrak, M.** Modeling of Closing Functions for Gate Valves Fitted with V-Ports. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2024, 15, 04024023, doi:10.1061/JPSEA2.PSENG-1588.

Impact Factor: **1,8**; Punktacja MNiSW w 2024 r.: **70 p**.

Wkład: **100%**.

[A7] **Kubrak, M.**; Kodura, A.; Urbanowicz, K.; Andrade, D.M. A Study of Valve-Induced Water Hammer in a Woven-Jacket Fire Hose. *Journal of Hydraulic Research* 2024, 62, 340–350, doi:10.1080/00221686.2024.2390433.

Impact Factor: **1,7**; Punktacja MNiSW w 2024 r.: **100 p**.

Wkład: opracowanie koncepcji badań, pozyskanie środków na badania, projekt stanowiska i wykonanie pomiarów hydraulicznych, opracowanie algorytmu, wykonanie oprogramowania i przeprowadzenie obliczeń numerycznych, analiza danych, przygotowanie i rewizja manuskryptu; **80%**.

4.3 Opis osiągnięcia naukowego

4.3.1 Wstęp

Ciśnieniowy transport cieczy stanowi jeden z filarów współczesnej gospodarki. Rurociągi stanowią bowiem nieodłączny element wielu procesów przemysłowych i komunalnych. Ich niezawodne działanie jest kluczowe dla funkcjonowania przemysłu chemicznego, petrochemicznego, energetyki, rolnictwa, czy systemów zaopatrzenia w wodę i odprowadzania ścieków. Jednym ze zjawisk, które stanowią zagrożenie dla stabilnego działania rurociągów ciśnieniowych jest uderzenie hydrauliczne.

Uderzeniem hydraulicznym nazywane są gwałtowne zmiany ciśnienia w przewodzie wywołane nagłymi w czasie zmianami prędkości i przepływu cieczy. Powstały ruch cieczy nazywany jest

jako nieustalony szybkozmienny. Zjawisko uderzenia hydraulicznego powstaje zwykle podczas nagłego zamknięcia/otwarcia zaworu lub wskutek raptownego wyłączenia lub włączenia pomp. Powstałe w ten sposób krótkotrwałe zmiany ciśnienia w przewodzie, mogą prowadzić do poważnych awarii – pęknięć rurociągów lub uszkodzenia armatury. Konsekwencje takich zdarzeń potrafią być bardzo kosztowne, zarówno pod względem finansowym, jak i społecznym. Awarie rurociągów ciśnieniowego transportu cieczy mogą powodować przerwy w dostawach wody, czy ropy naftowej, a także prowadzić do zanieczyszczenia środowiska. To sprawia, że tematyka nieustalonych szybkozmiennych przepływów w przewodach jest przedmiotem zainteresowania naukowców i praktyków od blisko 150 lat. Zrozumienie mechanizmów uderzenia hydraulicznego i wiarygodne prognozowanie powstałych w trakcie uderzenia zmian ciśnienia jest kluczowe dla przeciwdziałania ich negatywnym skutkom i zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji systemów rurociągów i optymalizacji ich pracy.

4.3.2 Przegląd stanu wiedzy

Badania nad uderzeniem hydraulicznym mają długą historię sięgającą XIX wieku. Choć często jako pioniera w tej dziedzinie wymienia się Michauda [1], to pierwsze prace teoretyczne na ten temat opublikował włoski inżynier Menabrea [2]. Spośród wielu osiągnięć tego okresu, najbardziej znane są badania Żukowskiego [3], który wyprowadził powszechnie stosowaną zależność pozwalającą oszacować przyrost ciśnienia wywołany nagłą zmianą prędkości przepływu cieczy w przewodzie:

$$\Delta p = \rho c V_0 \quad (1)$$

gdzie:

Δp – zmiana ciśnienia, ρ – gęstość cieczy, c – prędkość fali ciśnienia, V_0 – początkowa (przed inicjacją uderzenia hydraulicznego) średnia prędkość przepływu cieczy w przewodzie.

Podstawę współczesnego opisu uderzenia hydraulicznego stanowią prace Allievi'ego [4,5], który wyprowadził różniczkowe równania nieustalonego ruchu cieczy w przewodzie pod ciśnieniem. Badania kolejnych pokoleń naukowców, takich jak Wood [6], Parmakian [7], Streeter i Lai [8], czy Wylie i Streeter [9] przyczyniły się do znaczącego postępu w opisie matematycznym szybkozmiennych przepływów ciśnieniowych. Dzięki ich wkładowi sformułowano jednowymiarowe równania uderzenia hydraulicznego, które są dziś powszechnie stosowane w analizach naukowych:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

gdzie: V – średnia prędkość przepływu wody, H – wysokość ciśnienia, położenie, x – współrzędna przestrzenna, t – czas, D – średnica wewnętrzna przewodu, g – przyspieszenie ziemskie, f – współczynnik oporów ruchu.

Zależności te wyprowadza się z zasady zachowania pędu oraz zasady zachowania masy. Równanie (2) nazywane jest równaniem ilości ruchu, zaś (3) – równaniem ciągłości przepływu. Oba równania tworzą układ jednowymiarowych równań różniczkowych cząstkowych pierwszego rzędu typu hiperbolicznego z dwiema zmiennymi niezależnymi (x, t) i dwiema zmiennymi zależnymi $H(x, t)$, $V(x, t)$.

Pierwsze próby modelowania uderzenia hydraulicznego uwzględniały współczynnik oporów wywołanych tarciami w równaniu ilości ruchu, wyrażany analogicznie jak dla przepływów ustalonych (np. wzorem Colebrooka-White'a). To uproszczenie prowadzi jednak do istotnych rozbieżności pomiędzy wartościami obliczonych zmian ciśnienia a wynikami pomiarów hydraulicznych. Obliczone oscylacje ciśnienia wygasają znacznie wolniej niż obserwowane podczas eksperymentów na modelach fizycznych. Te niezgodności, przyczyniły się do opracowywania bardziej zaawansowanych modeli oporów wywołanych tarciami, co doprowadziło do powstania koncepcji tarcia nieustalonego. W literaturze można zidentyfikować dwie główne grupy modeli opisu tarcia nieustalonego [10]. Pierwsza grupa modeli uzależnia opory tarcia od chwilowej wartości przyspieszenia lokalnego oraz chwilowej wartości przyspieszenia adwekcyjnego. W anglojęzycznej literaturze modele te często opisuje się skrótem IAB (z ang. instant acceleration-based model). Do grupy tej zalicza się m.in. model Brunone [11]. Najczęściej przywoływany w literaturze i stosowany w praktyce model IAB stanowi poprawiony przez Vitkovsky'ego model Brunone [12]:

$$f = f_q + \frac{k_v}{V|V|} \left(\frac{\partial V}{\partial t} + c \operatorname{sign}(V) \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right) \quad (4)$$

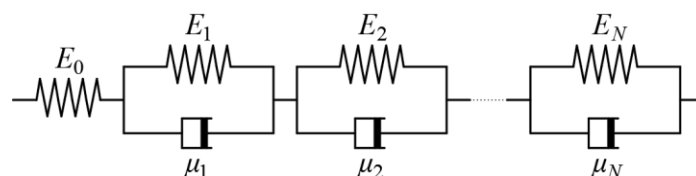
gdzie: f_q – quasi-ustalony współczynnik oporów, k_v – współczynnik tarcia nieustalonego.

Druga grupa modeli tarcia nieustalonego określana jest skrótem WFB (z ang. weighting function-based model) lub CB (z ang. convolution-based model). Cechą charakterystyczną tej grupy modeli tarcia jest to, że w obliczeniach uwzględnia się człony przyspieszenia dla czasu poprzedzającego inicjację uderzenia hydraulicznego. To podejście, pierwotnie zaproponowane przez Zielke'go dla ruchu laminarnego [13], zostało zaadaptowane do ruchu turbulentnego przez Vardy'ego i Brown'a [14,15]. Współczynnik oporów wyraża się zwykle zależnością:

$$f = f_q + \frac{32\mu}{D\rho V|V|} \int_0^t \frac{\partial V}{\partial t}(u) W(t-u) du \quad (5)$$

gdzie: W – bezwymiarowa funkcja wagowa, μ – dynamiczny współczynnik lepkości cieczy, u – czas, zmienna całkowania w całce splotowej.

W literaturze można odnaleźć liczne modyfikacje obu tych grup modeli tarcia [16], wprowadzane w celu poprawy zgodności wyników obliczeń prognostycznych z obserwacjami. Jednakże, nawet najbardziej zaawansowane modele opisu tarcia nieustalonego są niewystarczające w przypadku modelowania uderzenia hydraulicznego w przewodach wykonanych z materiałów o właściwościach lepkosprężystych. Lepkosprężystość materiału sprawia, że reaguje on na nagłe zmiany ciśnienia w cieczy w sposób bardziej złożony niż np. przewód stalowy. Reakcja przewodu lepkosprężystego na zmianę ciśnienia jest opóźniona w czasie, a powstałe oscylacje ciśnienia są wygładzone, występuje wzmożona dyssypacja energii a fala ciśnienia ulega dyspersji [17]. Matematyczny opis uderzenia hydraulicznego w rurociągach wykonanych z materiałów o własnościach lepkosprężystych jest inny niż w przypadku rur sprężystych. W tym celu stosuje się model konceptualny, nazywany też uogólnionym modelem Kelvina-Voigta, który stanowi połączenie modelu Hooke'a (sprężyna) i modelu Newtona (lepki tłumik) – rys. 1 [18,19].



Rys. 1. Model lepkosprężysty Kelvina-Voigta

Do opisu odkształceń materiału w czasie pod wpływem obciążenia służy tzw. funkcja pełzania, która umożliwia modelowanie zachowania materiałów lepkosprężystych. Funkcja pełzania w uogólnionym modelu Kelvina-Voigta wyrażona jest wówczas zależnością:

$$J(t) = J_0 + \sum_{k=1}^N J_k \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \quad (6)$$

gdzie: J_0 – podatność na odkształcenie pierwszej sprężyny zdefiniowana jako odwrotność modułu sprężystości E_0 , N – całkowita liczba elementów Kelvina-Voigta, J_k – podatność na odkształcenie k -tego elementu Kelvina-Voigta, τ_k – czas opóźnienia k -tego elementu Kelvina-Voigta.

Uwzględnienie lepkosprężystych własności rurociągu w równaniach nieustalonego przepływu cieczy wymaga modyfikacji równania ciągłości, które przybiera postać [19]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{2c^2}{g} \sum_{k=1}^N \frac{\partial \varepsilon_k}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

gdzie: ε_k – opóźnione odkształcenie k -tego elementu Kelvina-Voigta.

Przedstawione opisy matematyczne stanowią podstawę obecnie prowadzonych badań nad uderzeniem hydraulicznym. Współczesne prace naukowe dotyczące nieustalonych szybkozmiennych przepływów cieczy w przewodach ciśnieniowych są bardzo różnorodne. Mimo powszechnego stosowania metod numerycznych, w literaturze można odnaleźć także próby analitycznego rozwiązywania równań uderzenia hydraulicznego [20–22]. W ostatnich

latach coraz częściej podejmowana jest tematyka wzajemnej interakcji cieczy i ścianek przewodu [23–25]. Rosnące zainteresowanie badaczy dotyczy nieustalonych szybkozmiennych przepływów mieszanin wielofazowych [26,27], uderzenia hydraulicznego w rurociągach zawierających powietrze [28,29] oraz zjawiska kawitacji [30,31]. Nieustannie trwają również prace nad rozwojem i optymalizacją metod ograniczania skutków uderzeń hydraulicznych [32–34].

4.3.3 Cel osiągnięcia naukowego

W literaturze naukowej dotyczącej zjawiska uderzenia hydraulicznego dominują prace analizujące powstanie uderzenia hydraulicznego w układach rurociągów złożonych z przewodów o stałej średnicy i wykonanych z jednego materiału, którego własności mechaniczne nie zależą od parametrów przepływu. W praktyce inżynierskiej, rurociągi służące do ciśnieniowego transportu cieczy często składają się z szeregowo połączonych odcinków przewodów o różnych własnościach materiałowych. Powstała w nich fala ciśnienia transformuje się z uwzględnieniem zmian w fizycznej strukturze rurociągu. To sprawia, że opis uderzenia hydraulicznego w rurociągach złożonych z odcinków przewodów wykonanych z różnych materiałów, o różnych średnicach jest bardzo skomplikowany. **Głównym celem moich badań zaprezentowanych w cyklu publikacji było zweryfikowanie oraz rozszerzenie wiedzy, dotyczącej teoretycznych opisów jednowymiarowych szybkozmiennych przepływów cieczy w układach przewodów o niejednorodnej strukturze fizycznej lub wykonanych z materiałów, których własności mechaniczne zależą od hydraulicznych parametrów przepływu cieczy.** Badałem uderzenie hydrauliczne w rurociągach, w których występuje nagła zmiana średnicy przewodów, zmiana parametrów materiałowych układu przez dodanie elementów o własnościach lepkosprężystych, czy przewężenie przekroju wywołane montażem zasuwy. Przeprowadzone przeze mnie badania mają charakter numeryczno-doświadczalny. W 6 pracach ([A1], [A2], [A3], [A4], [A5] i [A7]) przedstawiłem wyniki obliczeń numerycznych i ich weryfikację w oparciu o wyniki pomiarów hydraulicznych. Praca [A6] zawiera jedynie analizy teoretyczne oparte na wynikach obliczeń numerycznych. Przeprowadzenie weryfikacji doświadczalnej w tym przypadku wiąże się ze znacznymi trudnościami, wynikającymi z konieczności przeprowadzenia badań w skali technicznej. Efekt instalacji tzw. V-portu, który jest przedmiotem pracy [A6], jest najbardziej widoczny w przypadku rurociągów o dużej średnicy i przy wolnych zamknięciach zasuwy, co istotnie utrudnia realizację eksperymentów. We wszystkich pracach wykorzystywałem wyniki obliczeń wykonanych własnymi programami obliczeniowymi. Programy obliczeniowe przygotowywałem w środowisku MATLAB. Badania hydrauliczne, których wyniki wykorzystywałem do weryfikacji wyników obliczeń i oceny przydatności metody obliczeń, prowadziłem w Laboratorium Mechaniki Płynów na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Do akwizycji wyników pomiarów z badań hydraulicznych wykorzystywanych w pracach [A3], [A4], [A5] i [A7] stosowałem własny system opracowany na bazie oprogramowania LabVIEW.

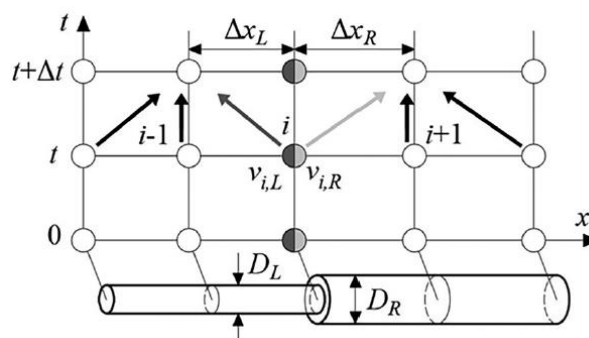
4.3.4 Symulacje numeryczne uderzenia hydraulicznego w rurociągach o zmiennej średnicy z wykorzystaniem schematu MacCormack'a

Projektowanie nowych i analiza funkcjonowania istniejących rurociągów ciśnieniowo transportujących ciecz wymaga precyzyjnego określenia wartości i miejsca wystąpienia ekstremalnych ciśnień przy różnych scenariuszach pracy rurociągów. Powszechnie stosowany przez praktyków i badaczy zajmujących się tą tematyką wzór Żukowskiego (1), używany do oszacowania maksymalnego wzrostu ciśnienia w przewodzie wywołanego nagłą zmianą prędkości przepływu cieczy, znajduje praktyczne zastosowanie jedynie dla rurociągów o stałej średnicy i wykonanych z jednorodnego materiału [35]. Wzór ten nie uwzględnia różnorodnej geometrii poszczególnych odcinków rurociągu, ani nie pozwala zidentyfikować konkretnych miejsc sieci lub instalacji narażonych na szybkozmiennne warunki przepływu. Aby kompleksowo przeanalizować oscylacje ciśnienia, konieczne jest przeprowadzenie obliczeń uderzenia hydraulicznego, których wyniki pozwolą na oszacowanie parametrów przepływu w dowolnym miejscu rurociągu i ich zmienność w czasie. W tym celu rozwiązuje się układ równań różniczkowych, opisujący jednowymiarowy nieustalony przepływ cieczy w przewodzie pod ciśnieniem. Jak już wspomniano, problem analitycznego modelowania uderzenia hydraulicznego jest wciąż przedmiotem prowadzonych badań [21]. Podstawowym narzędziem do uzyskiwania przybliżonego rozwiązania równań nieustalonego przepływu w rurociągu są metody numeryczne. Najczęściej stosowaną metodą używaną w tym celu jest metoda charakterystyk, którą w literaturze określa się skrótem MOC (ang. method of characteristics) [36].

Istota MOC polega na zamianie układu współrzędnych, która prowadzi do przekształcenia układu równań różniczkowych cząstkowych w układ równań różniczkowych zwyczajnych, który następnie rozwiązuje się numerycznie, wyrażając pochodne schematami różnicowymi [37]. Popularność tej metody wynika z tego, że jest ona stosunkowo prosta do zaprogramowania i efektywna obliczeniowo. Niestety, jak każda metoda numeryczna, MOC ma również wady. Równania opisujące uderzenie hydrauliczne w klasycznej metodzie charakterystyk są spełnione ściśle tylko na krzywych w płaszczyźnie czasoprzestrzennej, zwanych charakterystykami. Oznacza to, że aby uzyskać wyniki obliczeń w wybranych miejscach analizowanego rurociągu, powstała siatka obliczeniowa musi przecinać się w tych miejscach z charakterystykami. W przypadku jednorodnych rurociągów nie stanowi to większego problemu. Natomiast dla złożonych układów przewodów, o zmiennym przekroju, czy materiale, konstrukcja siatki charakterystyk jest utrudniona. Dlatego też, poszukuje się nowych sposobów numerycznego rozwiązywania układu równań nieustalonego przepływu, które pozwolą obliczać parametry uderzenia hydraulicznego i będą łatwe w implementacji nawet dla bardziej skomplikowanych układów przewodów.

Jedną z technik obliczeniowych, która dobrze sprawdza się przy numerycznym modelowaniu przepływów niestacjonarnych w przewodach pod ciśnieniem jest schemat MacCormack'a. Ten schemat numerycznego rozwiązywania różniczkowych równań uderzenia hydraulicznego stosunkowo niedawno został ulepszony przez Wana i Huanga [38]. Schemat MacCormack'a umożliwia wygodne dostosowanie siatki obliczeniowej dla rurociągów składających się z szeregowo połączonych odcinków o różnych właściwościach materiałowych. **W artykule [A1]**

do algorytmu obliczeniowego rozwiązującego równania szybkozmiennego nieustalonego przepływu cieczy schematem MacCormacka, wprowadziłem warunek brzegowy, uwzględniający połączenia odcinków rur wykonanych z materiałów o różnych własnościach wyprowadzony w oparciu o różnice skończone. Warunek ten pozwala na uwzględnienie zmiennej średnicy materiału oraz prędkości fali ciśnienia na różnych odcinkach rurociągu (rys. 2).



Rys. 2. Fragment siatki obliczeniowej z warunkiem brzegowym łączącym dwa przewody

Wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych zweryfikowałem w oparciu o wyniki badań uderzenia hydraulicznego w stalowym rurociągu o nagłych zmianach średnicy. Uzyskana zadowalająca zgodność obliczonych wartości ciśnienia z pomierzonymi potwierdza praktyczną przydatność przeprowadzonych analiz.

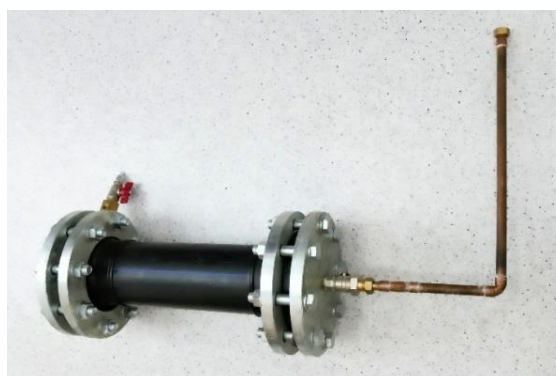
Właściwości mechaniczne materiału, z którego wykonany jest rurociąg mają zasadniczy wpływ na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego. W przewodach stalowych, a więc o własnościach sprężystych, pod wpływem wzrostu ciśnienia przewody ulegają natychmiastowemu odkształceniu. Kluczowym czynnikiem powodującym wygasanie (dyssypację) kolejnych oscylacji ciśnienia jest tarcie nieustalone. Rury plastikowe (wykonane z polimerów), charakteryzują się natomiast własnościami lepkosprężystymi. **W artykule [A2]** przedstawiłem porównanie wyników obliczeń uderzeń hydraulicznych w rurociągach plastikowych (wykonanych z HDPE) i nagłej zmianie średnicy z wynikami pomiarów na modelach fizycznych. W obliczeniach numerycznych rozbudowałem algorytm i program obliczeniowy wykorzystany w artykule [A1], przez wprowadzenie w równaniu ciągłości składnika reprezentującego lepkosprężyste własności przewodów. Wysoka zgodność obliczonych wartości ciśnień z wartościami z pomiarów hydraulicznych potwierdza, że opracowany model pozwala odwzorować nieustalony szybkozmienny przepływ cieczy w układach rurociągów złożonych z przewodów o różnych średnicach oraz wykonanych z różnych materiałów.

4.3.5 Wykorzystanie polimerowych boczników do tłumienia fal ciśnienia

Rozróżnia się trzy podstawowe sposoby ochrony rurociągów przed uderzeniem hydraulicznym [39]. Pierwszy, najprostszy z nich, polega na zastosowaniu armatury i wdrożeniu odpowiednich procedur, które nie dopuszczą do wystąpienia gwałtownych zmian prędkości przepływu, które w konsekwencji mogą prowadzić do niebezpiecznych oscylacji

ciśnienia w trakcie uderzenia hydraulicznego. Przykładem stosowania tego sposobu jest powolne manewrowanie zasuwami odcinającymi lub wykorzystanie pomp, umożliwiających ich powolne włączanie i wyłączanie. Drugi sposób polega na instalowaniu w rurociągu specjalnych urządzeń, które skutecznie tłumią powstałe podczas uderzenia hydraulicznego szybkozmienne oscylacje ciśnienia. Do takich urządzeń zalicza się m.in. zbiorniki wyrównawcze lub zawory bezpieczeństwa. Trzeci sposób obejmuje projektowanie nowych lub modyfikację istniejących układów rurociągów ciśnieniowych tak, aby dostatecznie zmniejszyć ich efektywną sztywność. Im bardziej podatny na odkształcenie jest materiał, z którego wykonany jest rurociąg, tym mniej gwałtowne będą zmiany ciśnienia wywołane nagłą zmianą prędkości przepływu. Stosowanie tego sposobu polega na wymianie odcinków rurociągu na wykonane np. z materiału o własnościach lepkosprężystych lub poprzez zainstalowanie dodatkowego polimerowego odcinka przewodu (bocznika) podłączonego do rurociągu głównego. Należy podkreślić, że pomimo różnorodności dostępnych sposobów ochrony sieci i instalacji przed uderzeniami hydraulicznymi, optymalny wybór sposobu jest utrudniony przez złożone, nieliniowe interakcje między poszczególnymi przewodami i urządzeniami układów rurociągów.

Wyniki eksperymentów hydraulicznych i obliczeń numerycznych dotyczących wykorzystania polimerowych boczników do tłumienia przepływów niestacjonarnych jako pierwszy przedstawił Pezzinga [40]. W swoich badaniach analizował działanie boczników wykonanych z HDPE podłączonych do rurociągu stalowego krótkim, prostym przewodem o tej samej średnicy co rurociąg główny. Pomiaru zmian ciśnienia wykonano wówczas jedynie dla prostych uderzeń hydraulicznych (przepływ nieustalony wywoływano gwałtownym, całkowitym otwarciem zaworu). W **artykule [A3]** przedstawiłem wyniki obliczeń numerycznych parametrów hydraulicznych oraz wyniki pomiarów uderzenia hydraulicznego w rurociągu z bocznikiem podłączonym do głównego rurociągu przewodem o mniejszej średnicy zagiętym w kształcie litery L (rys. 3).



Rys. 3. Bocznik HDPE z przewodem łączącym

Takie rozwiązanie umożliwia zastosowanie bocznika w warunkach, gdzie ograniczenia przestrzenne uniemożliwiają zainstalowanie dodatkowego rozgałęzienia z przewodem o tej samej średnicy, co rurociąg główny. Nowym elementem przeprowadzonych badań było również sprawdzenie działania boczników w warunkach występowania nieprostych uderzeń hydraulicznych. Badania hydrauliczne wykonano zarówno dla szybkich, jak i powolnych zamknięć zaworu w celu wywołania złożonych uderzeń hydraulicznych. Występowanie

i działanie bocznika w obliczeniach numerycznych uwzględniano poprzez wprowadzenie skupionego warunku brzegowego w jednym węźle siatki numerycznej, bez potrzeby modelowania całego rozgałęzienia (ang. lumped parameter). Doświadczalnie przeanalizowano działanie trzech boczników o różnych objętościach. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że zaproponowane rozwiązanie może być skuteczne w tłumieniu głównie prostych uderzeń hydraulicznych. Skuteczność bocznika w tłumieniu uderzeń złożonych malała wraz z wydłużaniem czasu zamykania zaworu. Obserwowano wtedy mniejsze różnice w tłumieniu ekstremalnych zmian ciśnienia względem układu bez bocznika. Mimo, że wpływ bocznika na uderzenia złożone jest ograniczony, wykazano, że zastosowanie takiego rozwiązania prowadzi do wydłużenia okresu fali ciśnienia i redukcji jej prędkości propagacji. Na podstawie przeprowadzonych badań hydraulicznych wykazano, że zmniejszenie średnicy przewodu łączącego bocznik z rurociągiem głównym ogranicza wpływ objętości bocznika na przebieg uderzenia hydraulicznego. Podobne wyniki tłumienia fal ciśnienia uzyskano dla boczników o różnych rozmiarach.

4.3.6 Wykorzystanie wstawek polimerowych do tłumienia fal ciśnienia

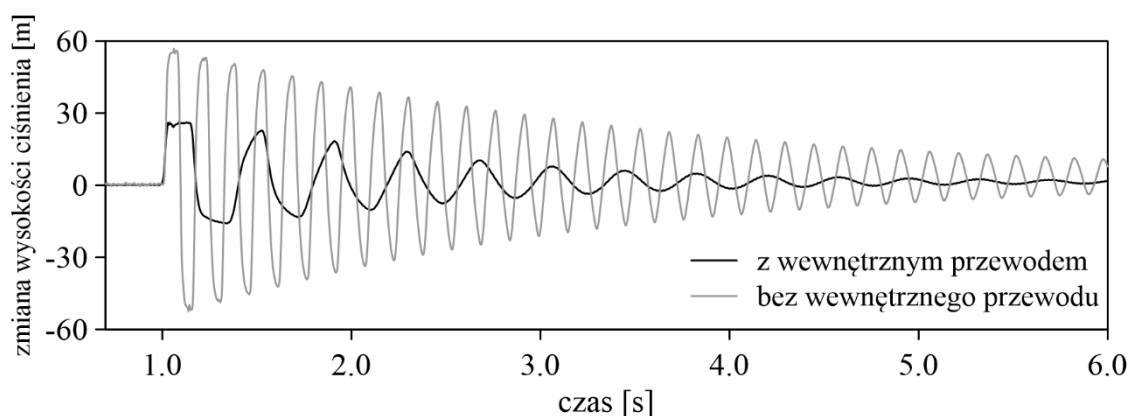
Innym sposobem tłumienia fal ciśnienia w rurociągach jest zastosowanie sekcji przewodu (wstawki) z materiału polimerowego. Chociaż badania nad skutecznością tego rozwiązania są prowadzone od wielu lat, to większość z nich koncentrowała się na układach o ujednoczonej geometrii [41]. W praktyce inżynierskiej, rurociągi ciśnieniowo transportujące ciecze na duże odległości często składają się z odcinków o różnych materiałach i średnicach wewnętrznych, co znacznie komplikuje analizę uderzenia hydraulicznego.

W **artykule [A4]** przedstawiłem wyniki pomiarów i obliczeń numerycznych zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągu złożonym z szeregowo połączonych odcinków stalowych i HDPE o różnych długościach i różnych średnicach wewnętrznych. Z przeglądu literatury wynika, że przeprowadzone przeze mnie badania eksperymentalne dla wielu kombinacji długości odcinków stalowych i polietylenowych, przy zachowaniu stałej długości całkowitej układu były pionierskie. Ponadto opracowałem opis i algorytm obliczeniowy szybkozmiennego przepływu, uwzględniający występowanie tarcia nieustalonego w sekcji stalowej oraz oddziaływanie lepkosprężystego odcinka przewodu wykonanego z HDPE wykorzystujący rozwiązanie metodą charakterystyk. Wyniki przeprowadzonych pomiarów hydraulicznych potwierdziły, że możliwe jest tłumienie gwałtownych zmian ciśnienia w rurociągu poprzez zastosowanie sekcji polimerowej o znacznie mniejszej średnicy niż rurociąg główny. Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono liniową zależność pomiędzy stosunkiem długości sekcji polimerowej i całkowitej długości rurociągu, a prędkością rozprzestrzeniania się fali ciśnienia. Ważnych wniosków dostarczyły wyniki z wykonanych obliczeń numerycznych. Wykazano, że parametry modelu numerycznego, w szczególności związane z modelowaniem właściwości lepkosprężystych sekcji HDPE, są zależne od konkretnej konfiguracji rurociągu. Próby zastosowania parametrów skalibrowanych dla jednego układu w obliczeniach innego układu o różnych długościach odcinków nie dały zadowalających wyników. Oznacza to konieczność indywidualnej kalibracji modelu dla każdej nowej konfiguracji rurociągu.

4.3.7 Wykorzystanie wewnętrznych przewodów elastycznych do tłumienia fal ciśnienia

Rzadziej wykorzystywanym sposobem kontroli szybkozmiennych przepływów niestacjonarnych w rurociągach jest umieszczanie wewnętrznych elastycznych przewodów w obszarze ciśnieniowego przepływu wody [42]. Tego rodzaju rozwiązanie ma na celu rozproszenie energii fali ciśnienia poprzez jej absorpcję przez wewnętrzny przewód wykonany z łatwo odkształcalnego materiału. Choć koncepcja ta znana jest od wielu lat, to brakuje wyników badań naukowych, które pozwoliłyby na pełne zrozumienie jej potencjału i możliwości wykorzystania w praktyce dla konkretnych rurociągów ciśnieniowych. Przyczyną niewielkiej liczby badań nad zastosowaniem wewnętrznych przewodów do uderzeń hydraulicznych może być fakt, że w przeszłości najczęściej stosowano przewody wewnętrzne wypełnione powietrzem. Tego typu rozwiązania, choć teoretycznie obiecujące, często okazywały się zawodne ze względu na tendencję do pęknięć i zapadania się pod wpływem dużych ciśnień wewnętrznych przewodów i w rezultacie do utraty ich właściwości tłumiących.

W ramach badań własnych [A5] zastosowałem przewód wewnętrzny wykonany z gumy EPDM o pełnym przekroju. Na podstawie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych, wykazano, że wykorzystany w badaniach przewód, ze względu na swoją elastyczność i odporność na uszkodzenia, może być skutecznym rozwiązaniem w tłumieniu gwałtownych zmian ciśnienia w rurociągu stalowym wywołanych nagłym zamknięciem zaworu. Wprowadzenie takiego elementu do rurociągu stalowego znacząco redukuje zarówno dodatnią jak i ujemną fazę uderzenia hydraulicznego, wydłużając jednocześnie okres fali ciśnienia i łagodząc kolejne amplitudy fali ciśnienia (rys. 4).



Rys. 4. Przykładowe porównanie pomierzonych oscylacji ciśnienia bez i z umieszczonym wewnętrznym gumowym przewodem

Pomimo relatywnie niewielkiej średnicy wewnętrznego gumowego przewodu w stosunku do średnicy rurociągu mierzonego w warunkach ciśnienia atmosferycznego (6 mm/ 53 mm), maksymalne przyrosty ciśnienia, dla niektórych rozpatrywanych warunków były prawie dwukrotnie mniejsze niż w przypadku rurociągu bez wewnętrznego przewodu. Stwierdzono również, że na skuteczność tego rozwiązania ma wpływ ciśnienie w rurociągu przed inicjacją zjawiska uderzenia hydraulicznego. Wynika to z faktu, że ciśnienie początkowe w rurociągu wpływa na objętość przewodu wewnętrznego, a tym samym na jego zdolność do absorpcji fali ciśnienia. W fazie wzrostu ciśnienia wewnętrzny przewód jest bardziej sprężony niż w fazie

spadku. W związku z tym, zastosowanie wewnętrznego przewodu gumowego jest bardziej efektywne w tłumieniu ujemnych uderzeń hydraulicznych.

4.3.8 Wpływ V-portu w zasuwie na oscylacje ciśnienia

Ciągłe zmiany w zapotrzebowaniu na natężenie przepływu cieczy oraz konieczność regulacji ciśnienia powodują powstawanie przepływów nieustalonych, które są nieodłącznym elementem pracy rurociągów. W praktyce inżynierskiej, najprostszym i najbardziej skutecznym sposobem zabezpieczenia rurociągu ciśnieniowego transportującego ciecz na duże odległości przed uderzeniem hydraulicznym jest zastosowanie armatury, która nie będzie doprowadzała do nagłych zmian prędkości przepływu cieczy. Jednym z kluczowych problemów inżynierskich jest wyznaczenie odpowiedniego czasu zamykania zaworów i zasuw. Zbyt szybkie zamknięcie zasuw może prowadzić do powstania gwałtownych zmian ciśnienia, które mogą uszkodzić rurociąg. Z kolei zbyt wolne zamykanie zasuw może spowodować niepożądane wydłużenie czasu trwania danego procesu technologicznego. Optymalny czas zamykania zasuw jest więc kompromisem między minimalizacją skutków uderzeń hydraulicznych a zapewnieniem efektywnej pracy systemu ciśnieniowego transportu cieczy.

Tzw. V-porty (nazywane przez praktyków „blendami”), to specjalnie wyprofilowane otwory w kształcie litery V, które mają na celu poprawę charakterystyki przepływu przez zasuwę (rys. 5).



Rys. 5. Zasuwa nożowa wyposażona w V-port

Głównym celem V-portu jest zwiększenie efektywności regulacji natężenia przepływu cieczy. **Artykuł [A6]** powstał w odpowiedzi na praktyczne zapotrzebowanie związane z projektowaniem rurociągów transportujących ścieki na duże odległości. Konieczność optymalizacji procesu zamykania zasuw, w celu minimalizacji ryzyka wystąpienia uderzenia hydraulicznego, była inspiracją do szczegółowej analizy wpływu charakterystyki V-portów na przebieg uderzenia hydraulicznego. Brak publikacji naukowych na ten temat skłonił mnie do przeprowadzenia własnych badań obejmujących zarówno analizy teoretyczne, jak i obliczenia numeryczne.

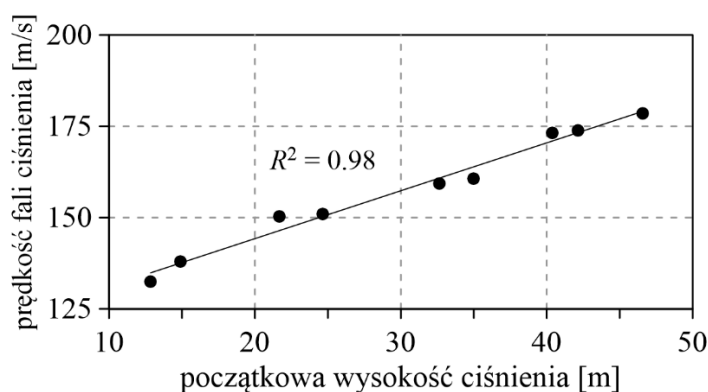
Głównym celem tej pracy było opracowanie uniwersalnych funkcji zamykania zasuw z zainstalowanym V-portem dla różnych kątów wewnętrznych V-portu i wpływu kąta wewnętrznego V-portu na przebieg zjawiska uderzenia hydraulicznego wywołanego

zamykaniem takiej zasuw. W tym celu wyprowadzono analityczne zależności do obliczeń pola przekroju strumienia wykorzystane do wyznaczenia stopnia otwarcia różnych kształtów zasuw i kątów wewnętrznych V-portu. Na tej podstawie opracowano bezwymiarowe zależności pomiędzy stopniem otwarcia, a czasem zamykania zasuw ze stałą prędkością odniesionym do całkowitego czasu zamknięcia zasuw. Do opisu tych zależności wykorzystano funkcje potęgowe. Zastosowanie funkcji potęgowej do opisu zamykania zasuw z V-portem było podyktowane względami praktycznymi. Taka postać tej funkcji sprawia, że łatwo ją zaimplementować w różnych programach obliczeniowych, niezależnie od użytej metody numerycznej do rozwiązania równań uderzenia hydraulicznego i może być wykorzystana przez innych badaczy i inżynierów do przeprowadzenia własnych analiz. Także komercyjne programy wykorzystywane do analizy uderzeń hydraulicznych, takich jak Bentley Hammer, definiują funkcje zamykania zasuw właśnie za pomocą funkcji potęgowej. Na podstawie wyników przeprowadzonych obliczeń numerycznych wyjaśniono wpływ różnych funkcji zamykania na przebieg uderzenia hydraulicznego w prostym systemie zbiornik-rurociąg-zasuwa/zawór. Wskutek zainstalowania V-portu zależność między położeniem noża zasuw a natężeniem przepływu cieczy ma charakter zbliżony do funkcji liniowej. W efekcie regulacja natężenia przepływu przebiega płynniej, co pozwala na uniknięcie gwałtownych skoków ciśnienia. Wyniki przeprowadzonych obliczeń jednoznacznie potwierdzają, że zastosowanie V-portu może być skutecznym sposobem kontroli uderzeń hydraulicznych.

4.3.9 Uderzenie hydrauliczne w węź strażackim

Badania przedstawione w **artykule [A7]** podjęto ze względu na fakt, że węże strażackie zmieniają swoją sztywność w zależności od ciśnienia przepływającej cieczy w ich wnętrzu. Ta unikalna cecha wpływa na przebieg uderzenia hydraulicznego. Pomimo powszechnej świadomości wśród strażaków o znaczeniu tego zjawiska dla bezpieczeństwa i skuteczności działań gaśniczych, nie udało się odnaleźć żadnych wcześniejszych wyników badań naukowych bezpośrednio dotyczących tego zagadnienia. Z tego względu praca ma charakter pionierski.

W ramach badań przeprowadzono pomiary podczas uderzenia hydraulicznego powstałego przy różnych wartościach ciśnienia cieczy w węź. Wyniki pokazały jednoznaczną zależność pomiędzy początkowym ciśnieniem w węź a jego reakcją na przebieg zmian ciśnienia podczas uderzenia hydraulicznego. Dla analizowanego zakresu ciśnień początkowych, zaobserwowano liniową zależność pomiędzy początkową wysokością ciśnienia cieczy w węź a prędkością fali ciśnienia (rys. 6).



Rys. 6. Wartości prędkości fali ciśnienia w funkcji wysokości ciśnienia początkowego

Dla wszystkich przeprowadzonych doświadczeń hydraulicznych wykonałem porównawcze obliczenia numeryczne. W tym celu opracowałem algorytm rozwiązujący równania uderzenia hydraulicznego w przewodzie z materiału lepkosprężystego wykorzystujący metodę charakterystyk. Obliczenia wykonywano w różnych wariantach – dla jednego, dwóch i trzech elementów z modelu Kelvina-Voigta. Do kalibracji współczynników pełzania zastosowałem algorytm genetyczny. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że nawet stosunkowo prosty model z jednym elementem z modelu Kelvin–Voigta był w stanie poprawnie prognozować przebieg obserwowanego uderzenia hydraulicznego w węźle, a zastosowanie dwóch elementów pozwoliło na bardzo dokładne odtworzenie pomierzonych oscylacji ciśnienia.

4.3.10 Podsumowanie

Mój oryginalny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport, zaprezentowany w cyklu siedmiu publikacji naukowych, obejmuje:

- Wyprowadzenie i zaimplementowanie warunku brzegowego w algorytmie numerycznym rozwiązującym różniczkowe równania szybkozmiennego przepływu schematem MacCormack'a, umożliwiające modelowanie uderzenia hydraulicznego w rurociągu zbudowanym z szeregowo połączonych przewodów o zróżnicowanych średnicach oraz wykonanych z różnych materiałów. Opracowany algorytm umożliwia uwzględnienie występowania tarcia nieustalonego zgodnie z modelem Brunone-Vitkovsky'ego oraz uwzględnienie własności lepkosprężystych wybranej sekcji rurociągu poprzez wykorzystanie modelu Kelvina-Voigta. Zastosowany schemat obliczeniowy pozwala na modelowanie przepływu szybkozmiennego w rurociągach o niejednorodnej strukturze ze względu na fakt, że krok czasowy obliczeń nie jest bezpośrednio związany z krokiem przestrzennym, tak jak ma to miejsce w powszechnie stosowanej metodzie charakterystyk. Wyniki przeprowadzonych obliczeń prognostycznych porównałem z wynikami pomiarów parametrów uderzenia hydraulicznego na modelach fizycznych przewodów połączonych szeregowo o różnych średnicach. Eksperymenty wykonano na stanowiskach składających się z rur stalowych i rur HDPE w różnych konfiguracjach. Obliczone oraz pomierzone oscylacje ciśnienia były zgodne, co dowodzi praktycznej przydatności opracowanego modelu numerycznego.

- Modyfikację opisywanego w literaturze sposobu łagodzenia uderzeń hydraulicznych polegającego na zainstalowaniu boczników polimerowych w rurociągach stalowych. Zaproponowane rozwiązanie przewiduje podłączenie bocznika do rurociągu głównego za pomocą zagiętego przewodu o mniejszej średnicy, co pozwala na jego łatwiejsze zastosowanie w praktyce. Wyniki pomiarów hydraulicznych wykazały, że tak zainstalowane boczniki mogą być skuteczne w tłumieniu zarówno prostych jak i złożonych uderzeń hydraulicznych, przy czym skuteczność tego rozwiązania maleje wraz z wydłużeniem czasu zamykania zaworu wywołującego przepływ nieustalony.
- Przeprowadzenie kompleksowych badań doświadczalno-numerycznych uderzenia hydraulicznego w rurociągu, składającym się z szeregowo połączonych odcinków o różnych średnicach wewnętrznych, wykonanych z różnych materiałów. Przeprowadzone pomiary hydrauliczne potwierdziły, że tłumienie nieustalonych przepływów z wykorzystaniem wstawek z tworzyw sztucznych możliwe jest również dla przewodów o własnościach lepkosprężystych o znacznie mniejszej średnicy niż rurociąg główny, zaś przeprowadzone obliczenia numeryczne wskazały na konieczność ponownej kalibracji współczynników pełzania sekcji polimerowej przy każdorazowej zmianie konfiguracji przewodów.
- Udoskonalenie metody tłumienia fal ciśnienia polegającej na zastosowaniu elastycznych wewnętrznych przewodów w postaci pełnego przewodu wykonanego z gumy EPDM. W przeciwieństwie do przewodów wewnętrznych wypełnionych powietrzem, zaproponowane rozwiązanie jest odporne na rozszczelnienie i utratę jego właściwości tłumiących. Badania hydrauliczne przeprowadzone dla różnych warunków początkowych wykazały, że nawet przy niewielkiej średnicy pełnego przewodu wewnętrznego w stosunku do średnicy rurociągu można osiągnąć znaczną redukcję amplitudy uderzenia hydraulicznego.
- Wyprowadzenie uniwersalnych funkcji zamykania zasuw z zainstalowanym V-portem dla różnych kątów wewnętrznych V-portu. Skonstruowane bezwymiarowe zależności pozwalają uwzględnić wpływ zainstalowania V-portu na zasuwie na przebieg nieustalonych zmian ciśnienia wywołanych jej zamknięciem. Opracowane funkcje zamykania zasuw mogą być wykorzystywane zarówno w programach komercyjnych, jak i w autorskich algorytmach rozwiązujących równania uderzenia hydraulicznego.
- Przeprowadzenie badań hydraulicznych i obliczeń numerycznych uderzenia hydraulicznego w węźu strażackim. Wyniki pomiarów i obliczeń wykazały wyraźny związek pomiędzy ciśnieniem początkowym cieczy w węźu a przebiegiem uderzenia hydraulicznego.

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

Równoległe z pełnieniem obowiązków pracownika badawczo-dydaktycznego na Politechnice Warszawskiej pracowałem w latach 2017-2019 w **Institucie Technologiczno-**

Przyrodniczym (ITP) w Falentach. W ITP zostałem zatrudniony w projekcie Inomel finansowanym w ramach programu BIOSTRATEG przez NCBiR. Projekt był realizowany przez konsorcjum trzech jednostek: ITP w Falentach, Szkołę Główną Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie i Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu. Jego celem było opracowanie systemu monitoringu, prognozowania i operacyjnego planowania regulowanych odwodnień i nawodnień podsiąkowych w skali obiektu melioracyjnego. W tym celu wybrane obiekty melioracyjne wyposażono w innowacyjne urządzenia do regulacji odpływu podziemnego oraz do regulacji i pomiaru natężenia przepływu wody w kanałach melioracyjnych.

W ramach projektu opracowano i przetestowano nowe rozwiązania technologiczne. Byłem odpowiedzialny za opracowanie ulepszonych regulatorów odpływu wody z terenów zmeliorowanych. Prace te miały na celu stworzenie lekkich, ekonomicznych i odpornych na uszkodzenia regulatorów, które mogłyby stabilizować poziom wody w drenach i kanałach melioracyjnych. Rezultaty projektu umożliwiły racjonalizację gospodarki wodnej na obiektach melioracyjnych.

W trakcie projektu, z moim udziałem, opublikowano dwa artykuły w czasopismach posiadających wskaźnik Impact Factor:

- Kubrak, J.; Kubrak, E.; Kaca, E.; Kiczko, A.; **Kubrak, M.** Theoretical and Experimental Analysis of Operating Conditions of a Circular Flap Gate for an Automatic Upstream Water Level Control. *Water* 2019, 11, 2576, doi:10.3390/w11122576.
- Kubrak, E.; Kubrak, J.; Kiczko, A.; **Kubrak, M.** Flow Measurements Using a Sluice Gate; Analysis of Applicability. *Water* 2020, 12, 819, doi:10.3390/w12030819.

Dodatkowo, zostałem współautorem monografii, w której szczegółowo opisano opracowane rozwiązania dotyczące pomiaru natężenia przepływu wody w kanałach melioracyjnych:

- Kaca, E.; Kubrak, J.; Dąbkowski L.; Kubrak E.; Kiczko A.; Koziół A.; Kałuża T.; **Kubrak M.**; Krukowski M.; Szymczak T.; Kierasieński B. *Bogucki Wydawnictwo Naukowe Budowle i urządzenia do pomiaru przepływu wody w kanałach melioracyjnych: praca zbiorowa*; Bogucki Wydawnictwo Naukowe: Poznań, 2020; ISBN 978-83-7986-324-2.

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

6.1 Działalność dydaktyczna

Od 2014 r. prowadzę zajęcia dydaktyczne związane z mechaniką płynów i hydrauliką.

- 1) Przedmiot: Mechanika płynów 1. Kierunek i poziom: Inżynieria Środowiska, st. I stopnia
Rodzaj zajęć: ćwiczenia audytoryjne.
- 2) Przedmiot: Mechanika płynów 2. Kierunek i poziom: Inżynieria Środowiska, st. I stopnia
Rodzaj zajęć: ćwiczenia laboratoryjne.

- 3) Przedmiot: Hydraulika stosowana. Kierunek i poziom: Inżynieria Środowiska, st. II stopnia. Rodzaj zajęć: ćwiczenia laboratoryjne.
- 4) Przedmiot: Mechanika płynów. Kierunek i poziom: Ochrona Środowiska, st. I stopnia. Rodzaj zajęć: wykłady, ćwiczenia audytoryjne.
- 5) Przedmiot: Mechanika płynów. Kierunek i poziom: Biotechnologia, st. I stopnia. Rodzaj zajęć: ćwiczenia laboratoryjne.

Byłem promotorem 5 prac dyplomowych: 4 inżynierskich i 1 magisterskiej. Ponadto, jestem współautorem podręcznika akademickiego:

- Mitosek, M.; Matlak, M.; Kodura, A.; **Kubrak, M.** Zbiór zadań z hydrauliki dla inżynierii i ochrony środowiska, 2017, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 280 s., ISBN 978-83-7814-652-0

6.2 Działalność organizacyjna

- 1) Dwukrotnie (w 2020 r. i w 2024 r). zostałem wybrany jako przedstawiciel nauczycieli akademickich niezatrudnionych na stanowisku profesora lub profesora uczelni i nieposiadających stopnia naukowego doktora habilitowanego do Rady Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.
- 2) Dwukrotnie (w 2020 r. i w 2024 r). zostałem wybrany jako przedstawiciel nauczycieli akademickich niezatrudnionych na stanowisku profesora lub profesora uczelni i nieposiadających stopnia naukowego doktora habilitowanego do Kolegium Elektorów Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.
- 3) Pełniłem funkcję Pełnomocnika Dziekana ds. studiów na kierunku kształcenia Inżynieria Środowiska w kadencji 2020-2024 r.
- 4) Od 2.10.2023 r. jestem przewodniczącym komisji egzaminów dyplomowych na kierunku Inżynieria Środowiska na studiach I II stopnia w zakresie specjalności Inżynieria Wodna, Inżynieria Sanitarna i Wodna, Inżynieria Komunalna.
- 5) Od 1.09.2024 r. pełnię funkcję Prodziekana ds. Współpracy i Rozwoju na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

6.3 Działalność popularyzująca naukę

- 1) Od roku 2014 do roku 2018 uczestniczyłem w corocznych Dniach Otwartych organizowanych na Politechnice Warszawskiej, których celem jest zaprezentowanie oferty edukacyjnej i infrastruktury uczelni przyszłym studentom.
- 2) Od 2016 r. okazjonalnie prowadzę szkolenia i zajęcia pokazowe z zakresu techniki instalacyjnej w budownictwie i odnawialnych źródeł energii dla uczniów szkół średnich.

- 3) Od marca 2024 r., jako członek Polskiego Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, uczestniczę w pracach zespołu, realizującego projekt „Kształtowanie zdrowego i bezpiecznego środowiska w obiektach ochrony zdrowia” w ramach programu „Nauka dla Społeczeństwa” organizowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki. Pełnię w nim funkcję wykonawcy, eksperta ds. hydrauliki instalacji sanitarnych. Przewidziany okres realizacji projektu to 36 miesięcy.

7. Inne istotne informacje

7.1 Inne działania naukowe

Wyniki moich wcześniejszych badań, dotyczących wpływu umieszczenia przewodów wewnętrznych w obszarze ciśnieniowego strumienia cieczy podczas uderzenia hydraulicznego zostały opublikowane w czasopiśmie wydawnictwa ASCE (American Society of Civil Engineers):

- **Kubrak, M.**; Kodura, A. Water Hammer Phenomenon in Pipeline with Inserted Flexible Tube. *Journal of Hydraulic Engineering* 2020, 146, 04019054, doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001673.
- **Kubrak, M.** Experimental and Numerical Analysis of Water Hammer Phenomenon in Pipeline with Fiber Optic Cable. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 2021, 12, 04020066, doi:10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000522.

Prowadziłem również badania nad zagadnieniem uderzenia hydraulicznego w rurociągach transportujących wielofazowe mieszaniny:

- Kodura, A.; **Kubrak, M.**; Stefanek, P.; Weinerowska-Bords, K. An Experimental Investigation of Pressure Wave Celerity During the Transient Slurry Flow. In *Free Surface Flows and Transport Processes*; Kalinowska, M.B., Mrokowska, M.M., Rowiński, P.M., Eds.; GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences; Springer International Publishing: Cham, 2018; pp. 259–269 ISBN 978-3-319-70913-0.
- Kodura, A.; Weinerowska-Bords, K.; Artichowicz, W.; **Kubrak, M.**; Stefanek, P. In Situ Verification of Numerical Model of Water Hammer in Slurries. *Journal of Fluids Engineering* 2019, 141, 081115, doi:10.1115/1.4042959.
- Kodura, A.; Weinerowska-Bords, K.; **Kubrak, M.** Simplified Numerical Model for Transient Flow of Slurries at Low Concentration. *Energies* 2022, 15, 7175, doi:10.3390/en15197175.

W swojej pracy naukowej zajmowałem się również zagadnieniami hydrauliki koryt otwartych, m.in. opracowując inżynierski sposób oszacowania wpływu przepławek zbudowanych z kamiennych głazów na układ zwierciadła wody w rzece:

- **Kubrak, M.**; Smoliński, B.; Riha, J.; Kodura, A.; Popielski, P.; Jabłoński, K. The Application of a Minimum Specific Energy Concept for a Fish Ladder Design. *Archives of Civil Engineering* 2022, doi:10.24425/ACE.2022.140185.

W ostatnich latach zajmuję się opracowywaniem urządzeń do tłumienia uderzeń hydraulicznych. Jestem współautorem łącznie 3 patentów. Najnowszym osiągnięciem w tym zakresie jest patent uzyskany, wspólnie z dr hab. inż. Apoloniuszem Kodurą, na urządzenie, które wykorzystuje zjawisko interakcji fal ciśnienia do redukcji skutków uderzenia hydraulicznego:

- Kodura, A.; **Kubrak, M.** Dynamiczny tłumik, Wynalazek, Numer zgłoszenia: P.447479, Numer patentu/prawa: Pat.245759. Data zgłoszenia : 08-01-2024, Data udzielenia prawa: 13-06-2024

Obecnie uczestniczę w pracach nad budową nowego prototypu tego urządzenia.

Od września 2024 r. jestem promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Nerkowskiego, dotyczącej badań zmęczeniowych rurociągów poddanych cyklicznym, szybkozmiennym wahaniom ciśnienia.

7.2 Nagrody i wyróżnienia

- 1) Zająłem I miejsce w konkursie organizowanym przez Wydziałową Radę Samorządu „Złota Kreda” w kategorii „Najlepszy prowadzący ćwiczenia, laboratoria, projekty lub seminaria Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska w roku akademickim 2016/17”.
- 2) Zająłem III miejsce w konkursie organizowanym przez Wydziałową Radę Samorządu „Złota Kreda” w kategorii „Najlepszy prowadzący ćwiczenia, laboratoria, projekty lub seminaria Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska w roku akademickim 2017/18”.
- 3) Zająłem II miejsce w konkursie organizowanym przez Wydziałową Radę Samorządu „Złota Kreda” w kategorii „Najlepszy prowadzący ćwiczenia, laboratoria, projekty lub seminaria Wydziału Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska w roku akademickim 2018/19”.
- 4) W 2018 r. otrzymałem nagrodę indywidualną JM Rektora PW za osiągnięcia dydaktyczne.
- 5) W 2019 r. otrzymałem nagrodę indywidualną III stopnia JM Rektora PW za osiągnięcia naukowe.
- 6) W 2021 r. otrzymałem stypendium naukowe JM Rektora PW.

7.3 Działalność recenzencka

Recenzowałem ponad 20 artykułów naukowych w następujących czasopismach posiadających wskaźnik Impact Factor (zestawienie w porządku alfabetycznym):

- 1) Ain Shams Engineering Journal
- 2) Applied Sciences
- 3) Applied Water Science
- 4) Energies
- 5) International Journal of Pressure Vessels and Piping
- 6) Journal of Marine Science and Engineering
- 7) Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice
- 8) Journal of Water and Land Development
- 9) Journal of Water Process Engineering
- 10) Modelling
- 11) Reliability Engineering and System Safety
- 12) Scientific Reports
- 13) Sensors
- 14) Sustainability
- 15) Water

7.4 Działalność doradcza

Brałem udział w przygotowaniu ponad 20 ekspertyz i prac zleconych przez firmy prywatne (m.in. SWECO Polska, ENERGOPROJEKT-WARSZAWA SA, CDM Smith Sp. z o.o, WARBUD, POLAQUA) oraz przedsiębiorstwa państwowe (m.in. MPWiK – Warszawa, KGHM Polska Miedź S.A.). W pracach tych wykonywałem własnymi programami obliczenia prognostyczne uderzenia hydraulicznego w wielkośrednicowych rurociągach, transportujących ciśnieniowo ścieki w Gdańsku i w Warszawie. Kierowałem również dwiema pracami wykorzystującymi wyniki obliczeń programami CFD wykonywanymi na potrzeby projektowania bloku gazowo-parowego w Rybniku.

Wykaz ważniejszych opracowań, których jestem współautorem zestawilem poniżej:

- 1) Analiza numeryczna propagacji ciśnienia w rurociągach szlamowych podczas trwania zjawiska uderzenia hydraulicznego (KGHM Polska Miedź S.A., 2013–2016 r.).
- 2) Obliczenia weryfikacyjne parametrów hydraulicznych projektowanej przepławki dla ryb zlokalizowanej na rzece Wisłok (ENERGOPROJEKT Warszawa SA, 2020 r.).
- 3) Obliczenia uderzenia hydraulicznego w rurociągu ciśnieniowym Pompowni Ścieków Motława (CDM Smith Sp. z o.o., 2021 r.).
- 4) Obliczenia uderzenia hydraulicznego rurociągu pod Wisłą między zakładami „Farysa” i „Świderska” (Sweco Polska, 2023 r.).
- 5) Obliczenia CFD symulujące pracę ujęcia wody na potrzeby CCGT Rybnik pod względem hydraulicznym (ENERGOPROJEKT WARSZAWA SA, 2024 r.).

7.5 Dane naukometryczne

Sumaryczny Impact Factor obliczony na podstawie wszystkich moich publikacji wynosi 42,924. Dane dotyczące liczby publikacji w wybranych bazach naukowych, liczby cytowań i indeksu Hirscha (*h-index*) zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Dane dotyczące liczby cytowań z dnia 28.11.2024 r.

Źródło (liczba publikacji w bazie)	Suma cytowań	Bez autocytowań	Indeks Hirscha
Google Scholar (25)	175	b.d.	8
Scopus (21)	121	107	7
Web of Science (20)	100	88	7

.....
(podpis wnioskodawcy)

8. Spis literatury przywołanej w autoreferacie

1. Michaud, J. Coups de Be´lier Dans Les Conduites. E ´ tude Des Moyens Employe ´ s Pour En Attenuer Les Effects. Bull. Soc. Vaudoise Ing. Arch. 1878, 4(3,4), 56–64, 65–77.
2. Menabrea, L.F. Note Sur Les Effects de Choc de l’eau Dans Les Conduites. C. R. Hebd. Seances Acad. Sci. 1885, 47, 221–224.
3. Joukowski, N.E. Memoirs of the Imperial Academy Society of St. Petersburg. Russian translated by O Simin 1904, Proc. Amer. Water Works Assoc. 1898, 9(5).
4. Allievi, L. Teoria Generale Del Moto Perturbato Dell’acqu Ani Tubi in Pressione. Ann. Soc. Ing. Arch. Ithaliana 1903.
5. Allievi, L. Teoria Del Colpo d’ariete. Atti Collegio Ing. Arch. 1913.
6. Wood, F.M. The Application of Heaviside’s Operational Calculus to the Solution of Problems In Water Hammer. Journal of Fluids Engineering 1937, 59, 707–713, doi:10.1115/1.4020580.
7. Parmakian, J. Waterhammer Analysis; Prentice Hall: New York, 1955;
8. Streeter, V.L.; Lai, C. Water-Hammer Analysis Including Fluid Friction. T. Am. Soc. Civ. Eng. 1963, 128, 1491–1524, doi:10.1061/TACEAT.0008734.
9. Wylie, E.B.; Streeter, V.L.; Suo, L. Fluid Transients in Systems; Prentice Hall ; Prentice-Hall International: Upper Saddle River, N.J.; London, 1997; ISBN 978-0-13-934423-7.
10. Landry, C.; Nicolet, C.; Bergant, A.; Müller, A.; Avellan, F. Modeling of Unsteady Friction and Viscoelastic Damping in Piping Systems. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2012, 15, 052030, doi:10.1088/1755-1315/15/5/052030.
11. Brunone, B.; Golia, U.M.; Greco, M. Some Remarks on the Momentum Equations for Fast Transients. Hydraulic Transients with Column Separation (9th and Last Round Table of the IAHR Group) 1991, 201–209.
12. Vítkovský, J.P.; Bergant, A.; Simpson, A.R.; Lambert, M.F. Systematic Evaluation of One-Dimensional Unsteady Friction Models in Simple Pipelines. J. Hydraul. Eng. 2006, 132, 696–708, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:7(696).
13. Zielke, W. Frequency-Dependent Friction in Transient Pipe Flow. Journal of Basic Engineering 1968, 90, 109–115, doi:10.1115/1.3605049.
14. Vardy, A.E.; Brown, J.M.B. Transient, Turbulent, Smooth Pipe Friction. Journal of Hydraulic Research 1995, 33, 435–456, doi:10.1080/00221689509498654.
15. Vardy, A.E.; Brown, J.M.B. TRANSIENT TURBULENT FRICTION IN SMOOTH PIPE FLOWS. Journal of Sound and Vibration 2003, 259, 1011–1036, doi:10.1006/jsvi.2002.5160.
16. Jiang, D.; Zeng, C.; Lu, Q.; Guo, Q. Water Hammer in Pipelines Based on Different Friction Models. Sci Rep 2024, 14, 953, doi:10.1038/s41598-024-51409-9.
17. Weinerowska-Bords, K. Viscoelastic Model of Waterhammer in Single Pipeline – Problems and Questions. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics 2006, 53, 21.
18. Covas, D.; Stoianov, I.; Ramos, H.; Graham, N.; Maksimovic, C. The Dynamic Effect of Pipe-Wall Viscoelasticity in Hydraulic Transients. Part I—Experimental Analysis and Creep Characterization. Journal of Hydraulic Research 2004, 42, 517–532, doi:10.1080/00221686.2004.9641221.
19. Covas, D.; Stoianov, I.; Mano, J.F.; Ramos, H.; Graham, N.; Maksimovic, C. The Dynamic Effect of Pipe-Wall Viscoelasticity in Hydraulic Transients. Part II—Model Development, Calibration and Verification. Journal of Hydraulic Research 2005, 43, 56–70, doi:10.1080/00221680509500111.
20. García García, F.J.; Fariñas Alvariño, P. On an Analytic Solution for General Unsteady/Transient Turbulent Pipe Flow and Starting Turbulent Flow. European Journal of Mechanics - B/Fluids 2019, 74, 200–210, doi:10.1016/j.euromechflu.2018.11.014.

21. Urbanowicz, K.; Jing, H.; Bergant, A.; Stosiak, M.; Lubecki, M. Progress in Analytical Modeling of Water Hammer. *Journal of Fluids Engineering* 2023, 145, 081203, doi:10.1115/1.4062290.
22. Urbanowicz, K.; Bergant, A.; Stosiak, M.; Karpenko, M.; Bogdevičius, M. Developments in Analytical Wall Shear Stress Modelling for Water Hammer Phenomena. *Journal of Sound and Vibration* 2023, 562, 117848, doi:10.1016/j.jsv.2023.117848.
23. Aliabadi, H.K.; Ahmadi, A.; Keramat, A. Frequency Response of Water Hammer with Fluid-Structure Interaction in a Viscoelastic Pipe. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2020, 144, 106848, doi:10.1016/j.ymsp.2020.106848.
24. Andrade, D.M.; Bastos De Freitas Rachid, F.; Tijsseling, A.S. An Analysis of Fluid–Structure Interaction Coupling Mechanisms in Liquid-Filled Viscoelastic Pipes Subject to Fast Transients. *Journal of Fluids and Structures* 2023, 121, 103924, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2023.103924.
25. Andrade, D.M.; De Freitas Rachid, F.B.; Tijsseling, A.S. A New Model for Fluid Transients in Piping Systems Taking into Account the Fluid–Structure Interaction. *Journal of Fluids and Structures* 2022, 114, 103720, doi:10.1016/j.jfluidstructs.2022.103720.
26. Hao, Y.; Song, X.; Wang, C.; Fan, B.; Yang, K. Dynamic Characterization of Water Hammer in Gangue Fly Ash Slurry Pipelines during Valve Closure. *Sci Rep* 2024, 14, 11470, doi:10.1038/s41598-024-62504-2.
27. Zhang, Y.; Xi, Z.; Sun, L. Numerical Investigation of Water Hammer Effect in Pipeline of NPP Considering Two-Phase Compressible Flow. *Progress in Nuclear Energy* 2022, 150, 104287, doi:10.1016/j.pnucene.2022.104287.
28. Besharat, M.; Tarinejad, R.; Ramos, H.M. The Effect of Water Hammer on a Confined Air Pocket towards Flow Energy Storage System. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 2016, 65, 116–126, doi:10.2166/aqua.2015.081.
29. Paternina-Verona, D.A.; Coronado-Hernández, O.E.; Espinoza-Román, H.G.; Fuertes-Miquel, V.S.; Ramos, H.M. Rapid Filling Analysis with an Entrapped Air Pocket in Water Pipelines Using a 3D CFD Model. *Water* 2023, 15, 834, doi:10.3390/w15050834.
30. Jansson, M.; Andersson, M.; Karlsson, M. High-Speed Imaging of Water Hammer Cavitation in Oil–Hydraulic Pipe Flow. *Fluids* 2022, 7, 102, doi:10.3390/fluids7030102.
31. Urbanowicz, K.; Bergant, A.; Karadžić, U.; Jing, H.; Kodura, A. Numerical Investigation of the Cavitating Flow for Constant Water Hammer Number. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021, 1736, 012040, doi:10.1088/1742-6596/1736/1/012040.
32. Wan, W.; Zhang, B.; Chen, X.; Lian, J. Water Hammer Control Analysis of an Intelligent Surge Tank with Spring Self-Adaptive Auxiliary Control System. *Energies* 2019, 12, 2527, doi:10.3390/en12132527.
33. Triki, A.; Trabelsi, M. On the In-Series and Branching Dual-Technique - Based Water-Hammer Control Strategy. *Urban Water Journal* 2021, 18, 631–639, doi:10.1080/1573062X.2021.1919722.
34. Toumi, A.; Sekiou, F. Optimal Valve Closing Law for Improved Water Hammer Control: A Case from a Water Supply Pipeline in Guelma, Algeria. *AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society* 2024, 73, 200–216, doi:10.2166/aqua.2024.265.
35. Walters, T.W.; Leishear, R.A. When the Joukowski Equation Does Not Predict Maximum Water Hammer Pressures. *Journal of Pressure Vessel Technology* 2019, 141, 060801, doi:10.1115/1.4044603.
36. Pal, S.; Hanmaiahgari, P.R.; Karney, B.W. An Overview of the Numerical Approaches to Water Hammer Modelling: The Ongoing Quest for Practical and Accurate Numerical Approaches. *Water* 2021, 13, 1597, doi:10.3390/w13111597.
37. Szymkiewicz, R.; Politechnika Gdańska; Wydawnictwo Metody numeryczne w inżynierii wodnej; Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej: Gdańsk, 2012; ISBN 978-83-7348-457-3.

38. Wan, W.; Huang, W. Water Hammer Simulation of a Series Pipe System Using the MacCormack Time Marching Scheme. *Acta Mech* 2018, 229, 3143–3160, doi:10.1007/s00707-018-2179-2.
39. Triki, A. Water-Hammer Control in Pressurized-Pipe Flow Using a Branched Polymeric Penstock. *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.* 2017, 8, 04017024, doi:10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000277.
40. Pezzinga, G.; Scandura, P. Unsteady Flow in Installations with Polymeric Additional Pipe. *Journal of Hydraulic Engineering* 1995, 121, 802–811, doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:11(802).
41. Triki, A. Water-Hammer Control in Pressurized-Pipe Flow Using an in-Line Polymeric Short-Section. *Acta Mech* 2016, 227, 777–793, doi:10.1007/s00707-015-1493-1.
42. Tijsseling, A.S.; Kruisbrink, A.C.H. The Reduction of Pressure Wavespeeds by Internal Rectangular Tubes. 8.