

**WNIOSEK O WSZCZĘCIE POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO
W DZIEDZINIE NAUK INŻYNIERYJNOTECHNICZNYCH
W DYSCYPLINIE INŻYNIERIA MECHANICZNA**

Dr inż. Paweł Dzienis

Katedra Układów Dynamicznych

Wydział Mechaniczny

Politechnika Białostocka

ul. Wiejska 45C 15-351 Białystok

Spis treści

1. Kwestionariusz osobowy	3
1.1. Dane osobowe.....	3
1.2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.	3
1.3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych	3
2. 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
2.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	4
(cykl powiązanych tematycznie artykułów, opublikowanych w czasopismach naukowych oraz 1 złożonego wniosku patentowego).....	4
2.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego.....	4
2.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.....	8
2.3.1. Omówienie istniejącego stanu wiedzy i istoty problemu naukowego	9
2.3.2. Omówienie rezultatów badań wykonanych w pracach wskazanych do dzieła ..	12
2.3.3. Wnioski z wykonanych badań.....	23
2.3.4. Wykaz cytowanej literatury.....	26
3. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną, realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	32
4. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.	34
5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze.	37

1. Kwestionariusz osobowy

1.1.Dane osobowe.

Imię i nazwisko: Paweł Dzienis

Identyfikatory autora publikacji:

WoS Researcher ID: GQP-5842-2022

Scopus Author ID: 55446207900

ORCID ID: 0000-0001-9200-8760

1.2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

doktor nauk technicznych: lipiec 2015, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, dyscyplina: Mechanika, specjalność: Mechanika Płynów, tytuł rozprawy: *Dynamika formowania się pęcherzy w cieczy ponad wylotem dyszy przy małych wydatkach powietrza*, promotor: prof. dr hab. inż. Romuald Mosdorf (skan dyplomu poświadczającego uzyskanie stopnia doktora przedstawiono w Załączniku Z1),

magister: czerwiec 2011, kierunek Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność Mechanika i Informatyka Stosowana, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,

inżynier: luty 2010, kierunek Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność Komputerowo Wspomagane Projektowanie i Wytwarzanie, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

1.3.Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

01.10.2023 – do dnia dzisiejszego - adiunkt, Katedra Układów Dynamicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

01.10.2015 - 30.09.2023 - adiunkt, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

01.10.2014 - 30.09.2015 - asystent, Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka.

2. 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.).

Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

2.1.Tytuł osiągnięcia naukowego

(cykl powiązanych tematycznie artykułów, opublikowanych w czasopismach naukowych)

Główne osiągnięcie naukowe, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r, stanowi jednotematyczny cykl publikacji pt. *Wpływ niewielkich fluktuacji przepływu cieczy wokół dyszy na wzrost pęcherzy gazowych*. Cykl składa się z 8 artykułów w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR). Osiągnięciami naukowymi, płynącymi z cyklu publikacji, stanowiącymi wkład w dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna są:

- Opracowanie metodyki badań doświadczalnych procesu formowania się pęcherzy gazowych w przy niewielkich zaburzeniach przepływu cieczy wokół dyszy.
- Wykonanie modelu numerycznego procesu formowania się pęcherzy gazowych. Walidacja wyników symulacji numerycznych z rezultatami badań eksperymentalnych przy wykorzystaniu metod nieliniowej analizy danych.
- Weryfikacja i potwierdzenie hipotezy: *modyfikacja warunków hydrodynamicznych ponad dyszą pozwala na otrzymanie periodycznego procesu odrywania się pęcherzy oraz zapobieganie łączeniu się pęcherzy podczas ich odlotu z sąsiadujących dysz.*
- Zaprojektowanie, na podstawie wykonanych badań, rozwiązań technicznych urządzeń do napowietrzania wody, w tym złożenie wniosku o ochronę patentową P.441609 - Urządzenie do generowania mikro lub nanopęcherzy gazowych w cieczach - Dzienis Paweł, Ołdziej Daniel, Koszewnik Andrzej, Mosdorf Romuald Paweł, data zgłoszenia: 30-06-2022.

Cykl powiązanych tematycznie artykułów został opublikowany w latach 2019-2024, w okresie po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych. Jestem pierwszym autorem 6 publikacji oraz jedynym autorem 2 publikacji naukowych. Wskazane do dzieła prace zostały przedstawione w tabeli 1 (rozdział 2.2), wraz z podanym moim wkładem merytorycznym.

2.2.Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Dane dotyczące pracy	Informacje dodatkowe ¹
[1] Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald Paweł, Czarnecki Jerry: The influence of water hardness perturbations on bubble departure dynamics, Scientific Reports 11 (2021) W pracy zajmowano się badaniem wpływu niewielkich zmian siły napięcia powierzchniowego na chaotyczność procesu odrywania się pęcherzy gazowych w cieczy. Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu koncepcji, metodologii badań oraz wykonaniu stanowiska badawczego i wykonaniu serii badań. Przygotowałem również koncepcję pracy oraz podjąłem się jej oceny merytorycznej. Przygotowałem i wykonałem analizy zarejestrowanych, podczas badań szeregów czasowych. Opracowałem wnioski płynące z wyników badań i ich analiz. Brałem udział w przygotowaniu całości tekstu. Odpowiedziałem merytorycznie na pytania od redaktorów i recenzentów. Dokonałem korekty końcowej manuskryptu. Najważniejszym opracowanym przeze mnie rezultatem jest wykazanie, że niewielki wzrost siły napięcia powierzchniowego powoduje większą wrażliwość procesu na pojawienie się chaotycznego odrywania się pęcherzy. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na 70%.	IF: 4.997 MNiSW: 140
[2] Dzienis Paweł, Zaborowska Iwona, Mosdorf Romuald: JRP analysis of synchronization loss between signals recording during bubble departures, Nonlinear Dynamic 108 (2022), 433–444. W pracy badano stabilność odrywania się pęcherzy gazowych. Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu koncepcji, metodologii badań oraz wykonaniu stanowiska badawczego i wykonaniu serii badań. Przygotowałem również koncepcję pracy oraz podjąłem się jej oceny merytorycznej. Przygotowałem i wykonałem analizy zarejestrowanych, podczas badań szeregów czasowych. Wykonałem badania numeryczne wpływu ciśnienia w układzie zasilania na proces zalewania dyszy cieczą. Przeanalizowałem otrzymane wyniki badań numerycznych. Opracowałem wnioski płynące z wyników badań i ich analiz. Brałem udział w przygotowaniu całości tekstu. Przygotowałem odpowiedzi merytoryczne na pytania od recenzentów. Współuczestniczyłem w wykonaniu korekty końcowej manuskryptu. Najważniejszym opracowanym przeze mnie rezultatem jest wykazanie, że gdy stabilizacja procesu zalewania dyszy cieczą trwa przez kilka kolejnych cykli odrywania się pęcherzy, wtedy zaczynają stabilizować się fluktuacje ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz. Pojawienie się stabilizacji fluktuacji ciśnienia i zalewania dyszy cieczą prowadzi do synchronizacji tych dwóch procesów i powrotu do periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na 70%.	IF: 5.1 MNiSW: 140
[3] Dzienis Paweł: Perturbations of the depth of liquid penetration into the	MNiSW: 100

capillary during the bubble departures, Acta Mechanica et Automatica 15(4) (2021), 254-259. W pracy badałem wpływ średnicy pęcherza i prędkości cieczy, generowanej przez odlatujący pęcherz, na proces zalewania dyszy cieczą. Najważniejszym osiągnięciem, jest wykazanie, że prędkość cieczy generowana przez pęcherze o różnych średnicach powoduje zmianę różnicy ciśnienia w układzie zasilającym dysze w gaz (mierzona pomiędzy maksymalnym ciśnieniem – ciśnienie przy którym zaczyna rosnąć pęcherz i ciśnieniem minimalnym – ciśnienie przy którym rozpoczyna się proces zalewania dyszy cieczą). W konsekwencji modyfikowana jest głębokość zalewania dyszy cieczą. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na 100%.	
[4] Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald: Liquid pressure fluctuations around a needle during bubble departures, Meccanica 58 (2023), 1307-1313. W pracy badano wpływ kolejnych cykli odrywania się pęcherzy gazowych na zmiany ciśnienia cieczy ponad dyszą. Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu koncepcji, metodologii badań oraz wykonaniu stanowiska badawczego i wykonaniu serii badań. Przygotowałem koncepcję pracy oraz podjąłem się jej oceny merytorycznej. Przygotowałem i wykonałem analizy zarejestrowanych, podczas badań szeregów czasowych. Opracowałem wnioski płynące z wyników badań i ich analiz. Brałem udział w przygotowaniu całości tekstu. Przygotowałem odpowiedzi merytoryczne na pytania od recenzentów. Wykonałem korektę końcową manuskryptu. Opracowana została przeze mnie metoda badania zmian warunków hydrodynamicznych ponad dyszą. Najważniejszym opracowanym przeze mnie rezultatem jest wykazanie, że zmiany ciśnienia cieczy ponad dyszą związane są ze średnicą oderwanego pęcherza, gdyż po oderwaniu się większego pęcherza ciśnienie ponad dyszą zaczyna maleć, natomiast po oderwaniu się drugiego, mniejszego pęcherza następuje wzrost jej ciśnienia do wartości neutralnej (charakterystycznej dla okresu oczekiwania na pojawienie się pęcherza). Mój wkład w powstanie pracy oceniam na 80%.	IF: 2.4 MNiSW: 100
[5] Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald, Wyszowski Tomasz: Nonlinear dynamics of self-organising bubble departures from twin nozzles, Meccanica 54 (2019). W pracy badano hydrodynamiczne oddziaływanie pomiędzy pęcherzami odrywającymi naprzemiennie się z dwóch sąsiadujących dysz. Mój wkład w powstanie pracy polegał na współuczestnictwie w opracowaniu koncepcji, metodologii badań oraz wykonaniu stanowiska badawczego i wykonaniu serii badań. Przygotowałem koncepcję pracy oraz podjąłem się jej oceny merytorycznej. Przygotowałem i wykonałem analizy zarejestrowanych, podczas badań szeregów czasowych. Opracowałem wnioski płynące z wyników badań i ich analiz. Brałem udział w przygotowaniu całości tekstu. Przygotowałem odpowiedzi merytoryczne na	IF: 2.153 MNiSW: 100

pytania od recenzentów. Wykonałem korektę końcową manuskryptu. Najważniejszym opracowanym przeze mnie rezultatem jest wykazanie istnienia hydrodynamicznego oddziaływania pomiędzy pęcherzami i układami zasilania dyszy w gaz, z czego jeden układ zasilania jest układem determinującym częstotliwość odrywania się pęcherzy (ciśnienie podczas procesu wzrostu pęcherza fluktuuje ze stałą amplitudą i brak jest fluktuacji długookresowych), zaś drugi układ zasilania dyszy do niego się dopasowuje. Dopasowanie się częstotliwości odrywania się pęcherzy prowadzi do naprzemiennego ich odrywania się z dwóch sąsiadujących dysz. Dopasowanie się częstotliwości możliwe jest poprzez spadki ciśnienia o charakterze długookresowym w dyszy podrzędnej. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na 70%.	
[6] Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald, Wyszkowski Tomasz, Tomaszuk Daniel: A hydrodynamic criterion of alternative bubble departures, Thermal Science 25(1B) (2021), 553-565. W pracy badano hydrodynamiczne oddziaływanie pomiędzy pęcherzami odrywającymi się naprzemiennie z dwóch sąsiadujących dysz. Mój wkład w powstanie pracy polegał na współuczestnictwie w opracowaniu koncepcji, metodologii badań oraz wykonaniu stanowiska badawczego i wykonaniu serii badań. Przygotowałem koncepcję pracy oraz podjąłem się jej oceny merytorycznej. Przygotowałem i wykonałem analizy zarejestrowanych, podczas badań szeregów czasowych. Opracowałem wnioski płynące z wyników badań i ich analiz. Brałem udział w przygotowaniu całości tekstu. Przygotowałem odpowiedzi merytoryczne na pytania od recenzentów. Wykonałem korektę końcową manuskryptu. Najważniejszym opracowanym przeze mnie rezultatem jest opracowanie bezwymiarowego współczynnika (ABD), przy którym występuje naprzemienne odrywanie się pęcherzy gazowych. Współczynnik ABD opracowałem w oparciu o liczbę Strohala. Podczas naprzemiennego odrywania się pęcherzy nie dochodzi do ich koalescencji. Współczynnik ABD uwzględnia: odległość pomiędzy dyszami, częstotliwość odrywania się pęcherzy (pojawienia się przepływu cieczy ponad dyszą) oraz prędkość wzrostu pęcherza. W przypadku gdy współczynnik ABD jest w zakresie $0.5 < ABD < 0.64$, występuje naprzemienne odrywanie się pęcherzy z dwóch sąsiadujących dysz i nie dochodzi do ich łączenia się. Współczynnik może być używany podczas projektowania urządzeń napowietrzających np. wodę, w celu optymalizacji procesu wymiany masy pomiędzy cieczą i gazem. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na 70%.	IF: 1.971 MNiSW: 70
[7] Dzienis Paweł, Golak Karol, Konopka Mateusz, Mosdorf Romuald, Bazienė Kristina, Gargasas Justinas: A hydrodynamic interaction between bubbles and gas supply system during gas bubble departures in liquids: an experimental study. Scientific Reports 13 (2023), numer artykułu:17979. W pracy badano eksperymentalnie hydrodynamiczne oddziaływanie pomiędzy pęcherzami odrywającymi się z dwóch sąsiadujących dysz i układem zasilania dyszy w gaz. Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu koncepcji,	IF: 4.6 MNiSW: 140

metodologii badań oraz wykonaniu stanowiska badawczego. Byłem współwykonawcą badań eksperymentalnych. Wykonałem analizy zarejestrowanych, podczas badań szeregów czasowych. Opracowałem wnioski płynące z wyników badań i ich analiz. Brałem udział w przygotowaniu całości tekstu. Przygotowałem odpowiedzi merytoryczne na pytania od recenzentów. Wykonałem korektę końcową manuskryptu. Najważniejszym opracowanym przeze mnie rezultatem jest wykazanie, że oddziaływanie hydrodynamiczne pomiędzy pęcherzami, a układem zasilania dyszy w gaz może być wykorzystane do kontrolowania procesu odrywania się pęcherzy z kilku dysz. Proces odrywania się pęcherzy gazowych z dysz, ma tendencję do samoorganizacji poprzez modyfikację częstotliwości odrywania się pęcherzy. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na 50%.	
[8] Dzienis Paweł: An influence of liquid flow above the needle on the bubble departures process: an numerical study – Acta Mechanica et Automatica, vol.18 no.3 (2024), DOI 10.2478/ama-2024-00. W pracy badano numerycznie oddziaływanie pomiędzy pęcherzami odrywającymi się z dwóch sąsiadujących dysz i układem zasilania dyszy w gaz. Najważniejszym opracowanym przeze mnie rezultatem jest numeryczne potwierdzenie wyników badań eksperymentalnych przedstawionych w pracy [7]. Mój wkład w powstanie pracy oceniam na 100%.	IF: 1.0 MNiSW: 100
Sumaryczny Impact Factor: 21.921 Sumaryczna liczba punktów MNiSW: 890	

* wskaźniki naukowometryczne dostępne zgodnie ze stanem na dzień publikacji pracy.

Oświadczenia autorów praz przedstawiono w Załączniku Z4.

2.3.Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Proces odrywania się pęcherzy, jest procesem, na który wpływ ma wiele czynników, dlatego też istnieje wiele prac, w których opisano eksperymentalne i numeryczne badanie zjawisk zachodzących podczas procesu formowania się kolumny pęcherzy gazowych. Głównym problemem badawczym jest możliwość kontroli tego procesu lub możliwość nim sterowania. Część czynników, wpływających na formowanie się kolumny pęcherzy możemy w pełni kontrolować np. wydatek powietrza dostarczany do dyszy/otworu, wysokość słupa cieczy, gęstość czy lepkość cieczy, objętość układu zasilającego dyszę w gaz. Występują również czynniki, których nie możemy kontrolować bezpośrednio i takim głównym czynnikiem są zaburzenia prędkości cieczy ponad dyszą/otworem. Niewielkie zaburzenia wielkości odrywających się pęcherzy (zmiana siły napięcia powierzchniowego), a w konsekwencji zmiany hydrodynamicznych warunków ponad dyszą mogą znacząco zmienić cały proces. Określenie wpływu tych czynników jest dość skomplikowane, gdyż zmiany hydrodynamiki w makro skali (w całej objętości zbiornika) są dość łatwe do zbadania, o tyle zbadanie zmian

warunków hydrodynamicznych tuż nad dyszą jest skomplikowane, ze względu na niedokładność używanych dotychczas metod pomiarowych.

W związku z tym, celem badań naukowych, opisanych w pracach wskazanych do dzieła, było określenie wpływu niewielkich zaburzeń siły napięcia powierzchniowego i prędkości cieczy ponad dyszą na dynamikę formowania się pęcherzy gazowych, a w szczególności zbadanie wpływu zmian tych parametrów na występowanie chaosu deterministycznego w tym procesie. Niewielkie zaburzenia siły napięcia powierzchniowego modyfikują wielkość odrywających się pęcherzy, co w konsekwencji wpływa na zmiany prędkości cieczy wokół dyszy. Określenie wpływu tych parametrów miało również na celu weryfikację hipotezy: *modyfikacja warunków hydrodynamicznych ponad dyszą pozwala na otrzymanie periodycznego procesu odrywania się pęcherzy oraz zapobieganie łączeniu się pęcherzy podczas ich odlotu z sąsiadujących dysz*. Określenie wpływu niewielkich zmian przepływu cieczy ponad dyszą badane było zarówno eksperymentalnie i numerycznie. Przedstawione w pracach (wskazanych do dzieła), wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych pozostają ze sobą zgodne.

Potwierdzenie przedstawionej hipotezy może zostać wykorzystane do opracowania sposobu kontroli i sterowania procesem odrywania się pęcherzy gazowych w cieczach. Kontrola procesu formowania się pęcherzy może zostać wykorzystana do optymalizacji urządzeń technicznych, w których występuje zjawisko przepływu pęcherzykowego. Osiągnięcie celu naukowego realizowane było poprzez zrozumienie wpływu zmian tych parametrów na odrywanie się pęcherzy gazowych z pojedynczej dyszy i powiązanie otrzymanych wyników badań z analizą zjawisk zachodzących podczas odrywania się pęcherzy gazowych z dwóch sąsiadujących dysz. Na podstawie badań opracowane zostało rozwiązanie techniczne generatora mikro/nano pęcherzy. Rozwiązanie to zostało zgłoszone jako wniosek o ochronę patentową do Urzędu Patentowego RP i zarejestrowane pod numerem P.441609 - Urządzenie do generowania mikro lub nanopęcherzy gazowych w cieczach - Dzienis Paweł, Ołdziej Daniel, Koszewnik Andrzej, Mosdorf Romuald Paweł, data zgłoszenia: 30-06-2022. Obecnie składane są również wnioski o finansowanie badań B+R w zakresie urządzenia służącego do napowietrzania wody, którego konstrukcja powstała na bazie wykonanych badań naukowych.

2.3.1. Omówienie istniejącego stanu wiedzy i istoty problemu naukowego

Wiele rzek i zbiorników zarówno wody słodkiej jak i morskiej jest silnie zanieczyszczonych związkami azotu czy fosforu, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia zasobów wody pitnej oraz wody, która może zostać wykorzystywana do celów przemysłowych. W celu oczyszczenia wody ze związków azotu i fosforu stosuje się urządzenia napowietrzające wodę. Napowietrzanie wody pozwala na utlenianie tych związków i zmniejszenie zanieczyszczenia wód. Projektowane urządzenia do napowietrzania muszą charakteryzować się niską energochłonnością, która wyrażona jest za pomocą współczynnika SAE (stosunek pomiędzy ilością tlenu transferowanego do wody, a ilością zużytej energii [kgO₂/kWh]). W przypadku napowietrzaczy generujących pęcherze powietrza, w celu zwiększenia wydajności urządzenia dąży się do niedopuszczenia do łączenia się generowanych pęcherzy gazowych i zmniejszenia

ich rozmiarów [P1,P2,P3] (zgodnie z zasadą mniejsze pęcherze przy stałej ich objętości w wodzie posiadają większą powierzchnię wymiany masy [P4,P5]). Generowane pęcherze nie mogą być rozmiarów nano, gdyż ich obecność powoduje choroby bąbelkowe ryb [P6]. Podczas projektowania urządzeń napowietrzających wodę, podejmowane są próby zwiększenia współczynnika SAE poprzez dążenie do periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych oraz kontrolowania procesu ich odrywania. Proces odrywania się pęcherzy gazowych ma charakter chaotyczny, co pokazano w pracach [P13,P15,P16,P56-P59,P60], a niewielkie zmiany ciśnienia statycznego, zmiany hydrodynamiczne przepływu cieczy wokół pęcherza, zmiany gęstości, lepkości czy też siły napięcia powierzchniowego powodują duże zmiany procesu formowania się pęcherzy gazowych. Aby udoskonalić urządzenie w makroskali należy wpięrcw poznać i zrozumieć proces odrywania się pęcherzy w mikroskali – czym zajmowałem się w swojej karierze naukowej.

Trwają próby kontroli procesu uwalniania się pęcherzy metanu odrywających się z dna oceanicznego w celu ich przechwytywania. Zabiegi te mają na celu zmniejszenia efektu cieplarnianego [P4]. Zastosowanie przepływu pęcherzykowego można również znaleźć w przemyśle farmaceutycznym do równomiernego mieszania medykamentów [P5,P6]. Ponadto sam proces odrywania się pęcherzy traktowany jest jako wstęp do badań nad tworzeniem się pęcherzy gazowych w procesie wrzenia, a zdobyta wiedza może być wykorzystywana podczas tworzenia miejsc nukleacji, dzięki czemu można wydłużyć żywotność chociażby wymienników ciepła [P7,P8].

Podczas badań eksperymentalnych i numerycznych pęcherze gazowe generowane są z dysz lub otworów w płycie (orifice) do cieczy [P12-P17]. Badane zjawiska można podzielić na kilka grup: procesy zachodzące w układzie zasilającym dyszę lub otwór w płycie [P12-P17], tworzenie się i wzrost pęcherza ponad dyszą/otworem [P18-P21], oddziaływanie pomiędzy pęcherzami generowanymi z jednej dyszy/otworu [P22-P26], oddziaływanie pomiędzy pęcherzami odrywającymi się z dwóch dysz/otworów [P27-P36], deformacje pęcherzy w trakcie ich ruchu [P37-P42], przepływ cieczy wokół pęcherza w trakcie jego odlotu [43-49], czy trajektorie odrywających się pęcherzy [P50-P55]. Wspólnym mianownikiem tych wszystkich badań jest chaotyczność tych procesów i problemy związane z ich kontrolowaniem. W pracach wyróżniono następujące czynniki wpływające na chaotyczność odrywania się, a następnie ruchu pęcherzy gazowych: czynniki powiązane z oscylacjami powierzchni rozdziału faz podczas wzrostu pęcherza (w tym oscylacje spowodowane przepływem cieczy wokół pęcherza) [P56-P59] oraz czynniki związane z niestacjonarnymi fluktuacjami ciśnienia w układzie zasilającym dyszę/orifice w gaz [P13,P15,P16,P60].

Pojedynczy cykl generowania pęcherza możemy podzielić na dwa etapy: czas wzrostu pęcherza i czas oczekiwania na pojawienie się pęcherza [P15-P19]. W trakcie oczekiwania na pojawienie się pęcherza gazowego, przy relatywnie niewielkich objętościowych wydatkach powietrza (rzędu 0.005 – 0.03 l/min) dysza zalewana jest cieczą. Proces ten związany jest ze spadkiem ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz, spowodowanym wzrostem pęcherza. Podczas prowadzonych badań, zaobserwowałem, że zmiana głębokość zalania dyszy cieczą jest najlepszym wyznacznikiem chaotyczności procesu odrywania się pęcherzy gazowych i

może być wykorzystana do badania wpływu niewielkich zaburzeń przepływu cieczy, czy właściwości fizyko – chemicznych cieczy na proces odrywania się pęcherzy gazowych. Głębokość zalewania dyszy cieczą zależna jest od wydatku powietrza dostarczanego do dyszy, gęstości cieczy, wysokości słupa cieczy i średnicy dyszy, z której jest generowana [P14]. Najlepiej widoczna jest ona dla dysz o średnicy 1 mm, dlatego też badania prowadziłem przy takiej średnicy dyszy. W pracach [P15,P16] numerycznie zbadano również wpływ prędkości cieczy ponad dyszą na proces zalewania dyszy i jego chaotyczny lub periodyczny charakter. Podczas prowadzenia badań zauważyłem, że niewielkie zmiany siły napięcia powierzchniowego mogą odgrywać znaczącą rolę na chaotyczny bądź periodyczny charakter procesu odrywania się pęcherzy gazowych. W konsekwencji badania rozpocząłem od weryfikacji wpływu siły napięcia powierzchniowego na głębokość zalania dyszy cieczą. Dodatkowo użyte, w pracy [P16] metody nieliniowej analizy danych pozwoliły na zbadanie scenariusza utraty periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych (pojawienia się chaotycznych zmian głębokości zalewania dyszy cieczą), ale mechanizm powrotu do periodycznego charakteru tego procesu nie został zbadany. Badania należało również uzupełnić o tę nową wiedzę.

W literaturze można również znaleźć badania dotyczące formowania się pęcherzy gazowych i przepływów formujących się tuż za nim [P43,P61,62]. Podejmowane są próbnym eksperymentalnego i numerycznego zbadania procesu formowania się wirów wokół pęcherza, wprawiających ciecz w ruch tuż za pęcherzem. Można przypuszczać, że wpływają one na chaotyczny charakter odrywania się pęcherzy, gdyż modyfikują warunki hydrodynamiczne ponad dyszą lub otworem. W pracy [P15] zauważono również, że podczas chaotycznego odrywania się pęcherzy gazowych zmieniają się rozmiary kolejno odrywających się pęcherzy, co również wprowadza zaburzenia w warunkach hydrodynamicznych ponad dyszą. Jedną z wykorzystywanych metod, do badania zmiany warunków hydrodynamicznych, jest metoda PIV. Wadą tej metody jest fakt, że pozwala ona na zbadanie tworzenia się przepływu w skali makro – całej objętości zbiornika, a nie w pobliżu dyszy. W metodzie PIV, brak jest możliwości weryfikacji zmiany prędkości cieczy ponad dyszą, co jest związane z warunkami oświetlania cząstek zawieszonych w cieczach. Pęcherz oraz dysza lub płyta z otworem odbijają światło oraz powoduje zacienienie obszaru wokół niego. W trakcie swoich badań podjąłem próbę zbadania rozkładu prędkości cieczy ponad dyszą, z użyciem tej metody, co przedstawione zostało w pracy [P63]. Badania te nie spełniły oczekiwań, a wyniki były obarczone wysokim błędem. Dlatego też opracowałem metodę badania zmiany ciśnienia cieczy wokół dyszy, która została opisana w części – „omówienie rezultatów badań wykonanych w pracach wskazanych do dzieła”.

Wykonywane są również badania eksperymentalne i numeryczne mające na celu określenie czynników wpływających na sposób oddziaływania pomiędzy pęcherzami odrywającymi się z dwóch lub więcej dysz/ otworów [P27-P36]. Wykonane i opisane w pracach badania pozwoliły na określenie sposobów synchronizacji odrywania się pęcherzy z dysz/otworów: naprzemienne, jednoczesne, jednoczesne z odbijaniem się od siebie pęcherzy oraz chaotyczne. Podczas naprzemiennego odrywania się pęcherzy widoczny był efekt formowania się tzw. oczka, czyli we wstępnej fazie pęcherze się odpychały, a po

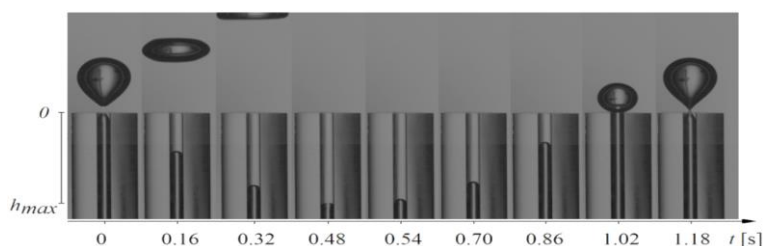
przepłynięciu określonej długości ponownie do siebie wracały. Proces ten zależny był od wydatków powietrza dostarczanego do dysz oraz odległości pomiędzy dyszami / otworami w płycie. Podczas naprzemiennego odrywania się pęcherzy, w żadnym cyklu odrywania się kolejnych pęcherzy nie dochodziło do ich łączenia, co może być wykorzystane do optymalizacji urządzeń wykorzystywanych do napowietrzania wody. Aby proces projektowania był łatwiejszy należy opracować bezwymiarowy współczynnik pozwalający na określenie występowania naprzemiennego odrywania się pęcherzy. Należy również zbadać, czy podczas odrywania się pęcherzy z dwóch dysz, pęcherze odrywające się z jednej dyszy, mogą determinować częstotliwość odrywania się pęcherzy gazowych z drugiej dyszy.

Podsumowując sam proces odrywania się pęcherzy, jest procesem, na który wpływ ma wiele czynników. Część z tych czynników możemy w pełni kontrolować np. wydatek powietrza dostarczany do dyszy/otworu, wysokość słupa cieczy, gęstość czy lepkość cieczy, objętość układu zasilającego dyszę w gaz. Występują również czynniki, których nie możemy kontrolować bezpośrednio i takim głównym czynnikiem są zaburzenia prędkości cieczy ponad dyszą/otworem, a wpływają one na periodyczny lub chaotyczny charakter odrywania się pęcherzy. Czynniki te mogą być wykorzystane do kontroli procesu odrywania się pęcherzy i sterowania wielkością odrywających się pęcherzy. Kontrolę wielkości odrywających się pęcherzy oraz periodycznego charakteru odrywania się pęcherzy można wykorzystać do optymalizacji chociażby procesu napowietrzania i oczyszczania wód.

2.3.2. Omówienie rezultatów badań wykonanych w pracach wskazanych do dzieła

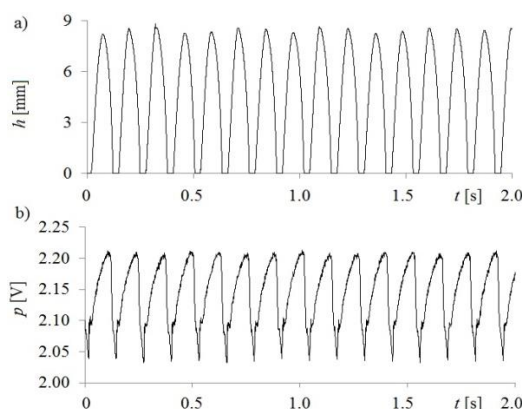
W swojej pracy naukowej badałem zagadnienia związane z dynamiką formowania się pęcherzy gazowych i dynamiką zalewania dyszy cieczą w trakcie trwania tego procesu. W trakcie badań wskazanych w pracy doktorskiej zauważyłem, że niewielkie zmiany siły napięcia powierzchniowego i prędkości cieczy ponad dyszą mogą modyfikować chaotyczną bądź periodyczną naturę odrywania się pęcherzy gazowych. Problem ten rozwiązywałem w dalszej karierze naukowej, po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych. Motywacją była również chęć zbadania wpływu zmian tych czynników na możliwość kontroli procesu odrywania się i oddziaływania pomiędzy pęcherzami gazowymi odrywającymi się z jednej i wielu dysz.

Badania prowadziłem z wykorzystaniem analizy filmów i danych rejestrowanych za pomocą czujników ciśnienia. Przykładowe, kolejne klatki nagrywanych filmów przedstawiono na Rys.1.



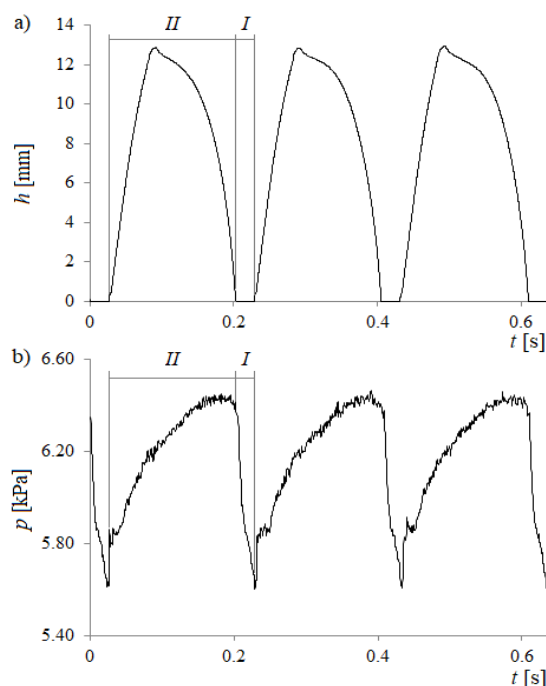
Rys. 1. Przykładowe, kolejne klatki filmu przedstawiające proces formowania się pęcherza i zalewania dyszy cieczą.

Korzystając z własnoręcznie wykonanego programu komputerowego, na podstawie kolejnych klatek filmów odzyskiwano szeregi czasowe zmiany głębokości zalewania dyszy cieczą, w kolejnych cyklach odrywania się pęcherzy gazowych. Przykładowy szereg przedstawiono na Rys.2 a.



Rys. 2. Przykładowe szeregi rejestrowane podczas badań nad dynamiką formowania się pęcherzy gazowych. a) zmiany głębokości zalania dyszy cieczą, w kolejnych cyklach odrywania się pęcherzy, b) fluktuacje ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz.

W trakcie badań, jednocześnie z filmami rejestrowane były szeregi czasowe fluktuacji ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz. Przykładowe szeregi czasowe przedstawiono na Rys.2.b.



Rys. 3. Zsynchronizowane szeregi czasowe. a) zmiany głębokości zalania dyszy cieczą, b) fluktuacje ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz.

Ze względu na fakt, że oba sygnały rejestrowane były przez różne urządzenia – zmiany głębokości zalewania dyszy cieczą, za pomocą kamery do szybkiej fotografii, zaś fluktuacje

ciśnienia za pomocą czujników ciśnienia i stacji akwizycji danych, rejestrację tych zjawisk należało zsynchronizować. Dlatego też opracowałem układ synchronizujący (składający się z lasera, fototranzystora i szkła mlecznego) oraz metodę synchronizacji danych. W metodzie tej, fototranzystor i czujniki ciśnienia podłączone były do stacji akwizycji danych, a oba sygnały były rejestrowane jednocześnie przez stację akwizycji danych. Wiązka światła generowana przez laser przechodziła przez szkło mleczne i trafiała do fototranzystora. W trakcie wykonywania serii badań wiązka lasera była chwilowo przysłaniana, co powodowało skok napięcia, rejestrowany przez stację akwizycji danych i zanik wiązki światła na szkle, rejestrowany na filmach. Skok napięcia i zanik światła traktowany był jako punkt synchronizacji. Metoda została opisana w pracy [P64].

W trakcie swoich badań stwierdziłem, że szeregi czasowe zalewania dyszy cieczą pozwalają na jednoznaczne określenie czasu oczekiwania na pojawienie się pęcherza (Rys.3 – oznaczone symbolem II) i czasu jego wzrostu (Rys.3 – oznaczone symbolem II), co nie jest tak oczywiste podczas badania szeregów czasowych fluktuacji ciśnienia. Dzięki temu badania te stają się bardziej kompleksowe i pozwalają na zbadanie możliwości kontrolowania procesu wzrostu pęcherzy gazowych w cieczach.

Podsumowując jednym z osiągnięć naukowych stanowiących wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna jest opracowanie metodologii badań procesu odrywania się pęcherzy gazowych z jednoczesnym badaniem zjawisk zachodzących w dyszy, czyli szeregów czasowych zmiany głębokości zalania dyszy cieczą w kolejnych cyklach odrywania się pęcherzy gazowych. Nowością stanowiącą wkład naukowy w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna jest również analiza wyników badań dynamiki odrywania się pęcherzy gazowych na podstawie zsynchronizowanych szeregów czasowych zmiany głębokości zalania dyszy cieczą i szeregów czasowych fluktuacji ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz. Odzyskiwanie czasów formowania się pęcherzy na podstawie szeregów zmiany głębokości zalania dyszy cieczą oraz wykorzystanie metod nieliniowej analizy danych do badania tych szeregów, jest nowością stanowiącą mój wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

Szeregi czasowe opisane powyżej, wykorzystałem do badania wpływu niewielkich zmian siły napięcia powierzchniowego i warunków hydrodynamicznych na proces odrywania się pęcherzy gazowych. Wykonane badania podzielić można na dwa podstawowe zagadnienia: wpływ warunków hydrodynamicznych na proces odrywania się pęcherzy gazowych z pojedynczej dyszy oraz wpływ warunków hydrodynamicznych na proces odrywania się pęcherzy z dwóch sąsiadujących dysz (hydrodynamiczne oddziaływanie pomiędzy pęcherzami i układem zasilania dyszy w gaz). Główną hipotezą weryfikowaną podczas prowadzonych badań była: *modyfikacja warunków hydrodynamicznych ponad dyszą pozwala na otrzymanie periodycznego procesu odrywania się pęcherzy oraz zapobieganie łączeniu się pęcherzy podczas ich odlotu z sąsiadujących dysz.*

Podczas badania procesu odrywania się pęcherzy gazowych z pojedynczej dyszy [P15] zauważyłem, że periodyczny lub chaotyczny charakter odrywania się pęcherzy gazowych może być powiązany ze zmianą warunków hydrodynamicznych wokół dyszy. Warunki hydrodynamiczne zależne są od wielkości pęcherzy. Na wielkość pęcherzy wpływa między

innymi siłą napięcia powierzchniowego. Dlatego też w pracy [1] opisano przebieg i wyniki badań eksperymentalnych dotyczących określenia wpływu małych zmian siły napięcia powierzchniowego na chaotyczny lub periodyczny charakter odrywania się pęcherzy gazowych. **Wynikami, przeze mnie uzyskanymi, stanowiącym nowy wkład naukowy w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna są:**

- **Wzrost natężenia przepływu powietrza powoduje zmniejszenie głębokości zalania dyszy cieczą ponieważ przy wzroście prędkości przepływu powietrza w dyszy, zmiany fluktuacji ciśnienia (podczas pojedynczego cyklu odrywania się pęcherzy) mają większy wpływ na dynamikę zalewania dyszy cieczą, niż zmiana siły napięcia powierzchniowego.**
- **Niewielki wzrost siły napięcia powierzchniowego powoduje wzrost ciśnienia, przy którym występuje proces odrywania się pęcherzy gazowych (wysokość słupa cieczy była stała).**
- **Niewielki wzrost siły napięcia powierzchniowego powoduje zmniejszenie prędkości wnikania cieczy do szklanej kapilary.**
- **Pęcherze gazowe rosną szybciej w wodzie niż roztworze węglanu wapnia w wodzie, ponieważ siła napięcia powierzchniowego jest mniejsza dla wody niż dla węglanu wapnia w wodzie.**
- **Niewielki wzrost siły napięcia powierzchniowego powoduje, że proces odrywania się pęcherzy staje się bardziej wrażliwy na pojawienie się chaotycznych zmian ciśnienia i chaotycznych zmian głębokości penetracji cieczy do dyszy (Tab.1.). W konsekwencji niewielki spadek siły napięcia powierzchniowego pozwala na skuteczniejszą kontrolę procesu odrywania się pęcherzy gazowych.**

Chaotyczny bądź periodyczny charakter odrywania się pęcherzy badałem na podstawie nieliniowego zachowania cieczy w kapilarze podczas kolejnych cykli wzrostu pęcherza. Badałem również powiązanie dynamiki zalewania dyszy cieczą z fluktuacjami ciśnienia powietrza w układzie zasilającym dyszę w gaz. W prowadzonych badaniach eksperymentalnych, pęcherze gazowe generowane były ze szklanej dyszy (o długości 75 mm i średnicy wewnętrznej 1 mm) do wody o zmodyfikowanej sile napięcia powierzchniowego. Ze względu na fakt, że chciałem przebadać wpływ niewielkich zmian siły napięcia powierzchniowego na periodyczność odrywania się pęcherzy gazowych wybrano jedynie dwie próbki wody. Była to woda:

- woda kranowa ($\sigma=72$ mN/m),
- roztwór wody z węglanem wapnia ($\sigma= 75$ mN/m).

Badania prowadzono również dla wody destylowanej, jednak różnica pomiędzy uzyskaną siłą napięcia powierzchniowego była już zdecydowanie większa, chociaż opisane tendencje zmian chaotyczności odrywania się pęcherzy gazowych były zgodne. Siłę napięcia powierzchniowego mierzyłem za pomocą Tensometru STA 1. Ponadto, w celu wyeliminowania wpływu temperatury wody na zaburzenia siły napięcia powierzchniowego zarówno podczas badania samej siły napięcia powierzchniowego cieczy, jak i podczas badania dynamiki formowania się pęcherzy, ciecz posiadała temperaturę $20 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Temperatura była kontrolowana za pomocą termometru MAXIM DS18B20. W trakcie

eksperymentu nagrywałem filmy rejestrujące proces zalewania dyszy cieczą i proces wzrostu pęcherza oraz mierzyłem fluktuacje ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz. Filmy rozłożone zostały na klatki i bazując na nich odzyskiwałem szeregi zmiany głębokości penetracji cieczy do dyszy. Uzyskane szeregi czasowe zalewania dyszy cieczą i fluktuacji ciśnienia zostały ze sobą zsynchronizowane, metoda synchronizacji została opisana w pracy [P64]. Szeregi czasowe zmiany głębokości zalania dyszy cieczą pozwalały mi na precyzyjne określenie czasu wzrostu pęcherza i czasu oczekiwania na jego pojawienie. Ponadto analizując klatki filmu określiłem wpływ siły napięcia powierzchniowego w funkcji wydatku powietrza na wielkość odrywających się pęcherzy. Zarówno szeregi czasowe penetracji cieczy do dysz jak i przebiegi czasowe fluktuacji ciśnienia w układzie zasilania dyszy w gaz poddane zostały nieliniowej analizie danych, pozwalającej na zbadanie stabilności periodycznego odrywania się pęcherzy w cieczach o zmodyfikowanych siłach napięcia powierzchniowego. Stabilność periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych badano w oparciu o następujące metody analizy: rekonstrukcja atraktorów, analizę czasów opóźnienia τ , wykładnik Lyapunva λ i wymiar korelacyjny D . Przykładowe wyniki badań przedstawiono w Tab. 1.

Tab. 1. Wartości współczynników: czasu opóźnienia τ , wykładnik Lyapunva λ i wymiar korelacyjny D .

	$q=0.005$ [l/min] water	$q=0.005$ [l/min] c-c aqueous solutions	$q=0.026$ [l/min] water	$q=0.026$ [l/min] c-c aqueous solutions
T	25	25	14	13
D	3.5	3.5	3.25	3.25
λ [bit/s]	1.86	4.66	13.41	20.76

Otrzymane rezultaty przedyskutowałem w oparciu o siły działające na rosnący pęcherz oraz siły wpływające na proces zalewania dyszy cieczą.

W badaniach opisanych w pracy [1] stwierdzono, że niewielki wzrost siły napięcia powierzchniowego prowadzi również do wzrostu średnicy odrywających się pęcherzy gazowych. Założyłem, że wzrost tej średnicy prowadzi do wzrostu prędkości cieczy znajdującej się ponad dyszą, co w konsekwencji prowadzi do modyfikacji warunków hydrodynamicznych ponad dyszą. Modyfikacja warunków hydrodynamicznych może prowadzić do chaotycznego charakteru odrywania się pęcherzy gazowych [15]. Stąd też sprawdziłem, czy niewielkie zmiany warunków hydrodynamicznych ponad dyszą i wrażliwość układu zasilania dyszy w gaz na ich zmianę, mogą być odpowiedzialne za większą wrażliwość na pojawienie się chaotycznego odrywania się pęcherzy. Dlatego wykonałem badania przedstawione w pracy [2], gdzie analizowany był powrót do periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych, zaś w pracy [3] analizowany był wpływ wielkości odrywających się pęcherzy na prędkość cieczy ponad dyszą i wpływ tych zmian na głębokość zlewania dyszy cieczą.

Mechanizmy prowadzące do chaotycznego lub periodycznego procesu odrywania się pęcherzy gazowych analizowano w pracy [2]. O ile w pracy [P16] wskazano, jakie czynniki prowadzą do utraty stabilnego (periodycznego) odrywania się pęcherzy, o tyle mechanizm

powrotu do periodycznego odrywania się pęcherzy nie został zbadany. Dlatego też pracy [2] zbadana została synchronizacja pomiędzy szeregami czasowymi fluktuacji ciśnienia powietrza w układzie zasilającym dyszę w gaz i głębokością penetracji dyszy cieczą. **Nowością stanowiącą mój wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna przedstawioną w pracy [2], w stosunku do pracy [P16] jest określenie mechanizmu powrotu procesu odrywania się pęcherzy gazowych do periodycznego formowania się kolumny pęcherzy gazowych. W przypadku, gdy stabilizacja procesu zalewania dyszy cieczą trwa przez kilka kolejnych cykli odrywania się pęcherzy, wtedy zaczynają stabilizować się fluktuacje ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz. Pojawienie się stabilizacji fluktuacji ciśnienia i zalewania dyszy cieczą prowadzi do synchronizacji tych dwóch procesów i powrotu do periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych. Zalewająca dyszę ciecz tłumi chaotyczne zachowania ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz. Słuszność stawianej w pracy hipotezy została również poparta wynikami badań numerycznych procesu zalewania dyszy cieczą.**

W celu zbadania powrotu procesu do periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych, wykonałem badania eksperymentalne, w których pęcherze gazowe generowane były ze szklanej dyszy (o długości 75 mm i średnicy wewnętrznej 1 mm) do wody destylowanej. W trakcie badań temperaturę wody kontrolowałem za pomocą termometru MAXIM DS18B20 i wynosiła ona $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$. W trakcie eksperymentu nagrywałem filmy rejestrujące proces zalewania dyszy cieczą oraz rejestrowałem fluktuacje ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz. Filmy rozłożyłem na klatki i bazując na nich odzyskałem szeregi zmiany głębokości penetracji cieczy do dyszy. Dane otrzymane ze stacji akwizycji zostały zsynchronizowane z danymi otrzymanymi z kamery do szybkiej fotografii. Podczas analizy wyników badań przedstawionych w pracy [2], wybrałem mody przejścia pomiędzy periodycznym i chaotycznym charakterem procesu odrywania się pęcherzy oraz powrotem do periodycznego odrywania się pęcherzy. Wybrane szeregi czasowe poddano nieliniowej analizie danych wykorzystującej wykresy rekurencyjne RP i JRP , współczynniki opóźnienia czasowego τ i współczynnik powtarzalności RR . Wykorzystany współczynnik RR obliczany był analizą okienkową i był traktowany jako miara synchronizacji szeregu czasowego zmiany głębokości zalania dyszy cieczą i zmian ciśnienia gazu w układzie zasilania dyszy.

W celu zbadania wpływu wielkości pęcherza na zmianę prędkości cieczy ponad dyszą, na podstawie badań eksperymentalnych opisanych w pracy [2] wykonałem modele numeryczne. **Wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych opisane zostały w pracy [3] i pozwoliły mi na sformułowanie wniosków stanowiących nowy wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna:**

- **Wyniki badań eksperymentalnych pokazują, że zarówno wzrost wydatku powietrza jak i niewielki wzrost napięcia powierzchniowego powoduje zwiększenie średnicy odrywającego się pęcherza. Ponadto pokazano, że zmiany napięcia powierzchniowego wpływają na zmiany zakresów fluktuacji ciśnienia ($\Delta p = p_{\max} - p_{\min}$) podczas pojedynczego cyklu odrywania się pęcherza. W analizowanym zagadnieniu Δp jest różnicą pomiędzy maksymalnym ciśnieniem (ciśnienie przy którym zaczyna się wzrost pęcherza), a minimalnym ciśnieniem (ciśnienie tuż po oderwaniu się pęcherza). Wykazano, że zmiany Δp odpowiadają za**

głębokość penetracji dyszy przez ciecz. Wzrost siły napięcia powierzchniowego powoduje wzrost Δp , co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia głębokości penetracji dyszy cieczą.

- Wyniki badań numerycznych pokazują, że wzrost średnicy pęcherza prowadzi do zwiększenia prędkości cieczy ponad dyszą (modyfikacji warunków hydrodynamicznych). Prędkość cieczy ponad dyszą modyfikuje różnicę ciśnienia Δp podczas pojedynczego cyklu odrywania się pęcherzy. Gdy prędkość cieczy maleje, Δp maleje. Kiedy Δp maleje, głębokość penetracji dyszy cieczą również maleje.**
- Przedstawiono również, że dla pęcherzy gazowych odrywających się w wodzie destylowanej wzrost wydatku powietrza nie powoduje zmiany głębokości zalania dyszy cieczą. Efekt ten został zbadany i stwierdzono, że z jednej strony wzrost strumienia objętości powietrza powoduje zmniejszenie Δp , a drugiej strony bardzo duży wzrost średnicy pęcherza w funkcji wzrost strumienia objętości powietrza powoduje wzrost prędkości cieczy ponad dyszą. Efekt ten powoduje utrzymanie niezmiennej głębokości w funkcji zmiany wydatku powietrza, co potwierdza hipotezę o możliwości kontroli procesu odrywania poprzez modyfikację warunków hydrodynamicznych ponad dyszą.**

W pracy [3], do analiz wykorzystałem sygnały czasowe oraz klatki filmu zarejestrowane w badaniach eksperymentalnych opisanych w pracach [1,2]. Badania te uzupełniłem o wyniki badań pęcherzy odrywających się w wodzie destylowanej. Siła napięcia powierzchniowego wody destylowanej wynosiła $\sigma=65.3$ mN/m (warunki temperaturowe badania siły napięcia powierzchniowego i przeprowadzania eksperymentu były takie same jak te opisane w pracy [1]). Dane z badań eksperymentalnych takie jak: średnica odrywającego się pęcherza i głębokość zalania dyszy cieczą przez ciecz o różnej wartości siły napięcia powierzchniowego, wykorzystałem do ustalenia warunków brzegowych podczas obliczeń numerycznych:

- wpływu średnicy pęcherza, na prędkość cieczy ponad dyszą,
- wpływu prędkości cieczy ponad dyszą na proces zalewania dyszy cieczą.

Do części a) wykorzystano model wykonany w środowisku COMSOL MULTIPHISICS, zaś do części b) wykonano model w środowisku SciLab, który został oparty na równaniu ruchu środka masy cieczy, uczestniczącej podczas procesu zalania dyszy. Model uwzględniał siłę związaną z różnicą ciśnienia występującego w dyszy i siłę związaną z oporem przepływu cieczy przez dyszę.

Sam wpływ prędkości cieczy ponad dyszą (warunków hydrodynamicznych) na proces odrywania się pęcherzy ponad dyszą został zbadany zarówno eksperymentalnie, jak i numerycznie w pracach [1,2,3], jednakże brak było eksperymentalnej weryfikacji tego jak proces wzrostu i odlotu pęcherza wpływa na zmianę warunków hydrodynamicznych ponad dyszą. Podjęte zostały próby wykorzystania technik PIV do zbadania prędkości cieczy ponad dyszą, a wyniki badań przedstawiono na konferencji i materiałach pokonferencyjnych [P63]. Metoda PIV pozwoliła na zbadanie rozkładu prędkości w skali makro (w całej objętości wody) zaś w mikroskali wyniki nie były możliwe do uzyskania. Problemem był cień rzucany przez odlatujące pęcherze, przez co nie można było odzyskać zmiany położenia cząstek

posiewu

w kolejnych klatkach. Było to związane z „gubieniem” przez dostępne oprogramowanie drobinek posiewu zaciemnianych przez cień pęcherza.

Dlatego też w pracy [4] została opisana, opracowana prze ze mnie metoda pozwalająca na badanie zmian ciśnienia cieczy w sąsiedztwie dyszy, z której generowane są pęcherze. Wykonane badania pozwoliły mi na sformułowanie wniosków stanowiących nowy wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna:

- Kolejne etapy wzrostu pęcherzy powodują zmiany warunków hydrodynamicznych wokół dyszy. Największe zmiany ciśnienia obserwuje się podczas etapu wzrostu pęcherza. W trakcie wzrostu większego pęcherza, ciśnienie wokół dyszy zaczyna maleć, a po jego oderwaniu znowu wzrasta.
- Potwierdzono uzyskane wyniki badań numerycznych mówiące o tym, że zmiany ciśnienia cieczy związane są z średnicą oderwanego pęcherza, gdyż po oderwaniu się drugiego, mniejszego pęcherza (jego średnica wynosiła 4,6 mm) następuje wzrost ciśnienia do wartości neutralnej (charakterystycznej dla okresu oczekiwania na pojawienie się pęcherza).
- W czasie oczekiwania na wzrost pęcherza gazowego obserwujemy niewielkie wahania ciśnienia cieczy ponad dyszą przy jej „neutralnej” wartości.
- Zmiany ciśnienia i prędkości cieczy nad dyszą modyfikują kształt wzrastającego pęcherza. Kształt pierwszego (większego pęcherza) jest zbliżone do kuli. Kształt drugiego pęcherza (mniejszego) jest zbliżone do elipsoidy, ze względu na przepływ cieczy za pęcherzem odlatującym. Przepływ ten skierowany jest ku górze zbiornika.
- Charakter zmian ciśnienia ponad dyszą jest okresowy i zależy od częstotliwości odrywania się pęcherzy.

Przestawiona w pracy metoda jest innowacyjną metodą pozwalającą na bezzakłócenkowe badanie warunków hydrodynamicznych wokół dyszy podczas etapu wzrostu pęcherza i etapu oczekiwania na pojawienie się pęcherza. Przedstawione w pracy wyniki badań mogą być użyte do modelowania procesu oddziaływania pomiędzy pęcherzami, co zostało wykorzystane w pracy [8].

W opisanej metodzie badania zmian ciśnienia cieczy ponad krawędzią dyszy, pęcherze generowałem w szklanym zbiorniku (200x150x500 mm). Zbiornik wypełniłem wodą destylowaną. Zastosowałem dwie mosiężne dysze o średnicy wewnętrznej 1 mm. Zaletą mosiężnych dysz w stosunku do dysz szklanych była grubość ich ścianki – dysza mosiężna posiadała średnicę zewnętrzną 2.2 mm zaś dysza szklana posiadała średnicę zewnętrzną 6 mm. Cieńsze ścianki pozwoliły na lepszą regulację odległości pomiędzy średnicami dysz. Z jednej dyszy generowałem pęcherze, zaś drugą podłączyłem do zamkniętego zaworu. W układach obu dysz znajdował się czujnik ciśnienia. W dyszy z zamkniętym zaworem, badałem zmiany ciśnienia cieczy ponad dyszą, podczas kolejnych etapów wzrostu pęcherza. Dysza ta znajdowała się w odległości 3 mm od dyszy, z której generowałem pęcherze. W eksperymencie zastosowałem czujniki ciśnienia MPX12DP, połączone ze stacją akwizycji danych DT9804. Częstotliwość rejestracji szeregów czasowych zmiany ciśnienia w dyszach wynosiła 2 kHz. Ponadto rejestrowałem filmy zawierające kolejne etapy wzrostu pęcherza. W

trakcie badań, z dyszy generowałem pęcherze w konfiguracji podwójnej tzn. wpierw odrywał się „większy” pęcherz o średnicy 7.1 mm, a tuż po nim mniejszy pęcherz o średnicy 4.6 mm. Zastosowanie, przeze mnie, podwójnej konfiguracji miało na celu potwierdzenie wyników badań numerycznych dotyczących wpływu wielkości pęcherza na zmianę warunków hydrodynamicznych.

Poznanie wpływu zmian warunków hydrodynamicznych ponad dyszą, na odrywanie się pęcherzy gazowych z pojedynczej dyszy, pozwoliło w kolejnym kroku, na kompleksowe badania procesu synchronizacji odrywania się pęcherzy z dwóch dysz i możliwość uzyskania periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych poprzez modyfikację warunków hydrodynamicznych ponad dyszami. W badaniach założyłem, że istnieje możliwość modyfikacji warunków hydrodynamicznych poprzez wykorzystanie pęcherzy odrywających się z sąsiadującej dyszy. W tym celu wykonałem badania mające na celu poznanie mechanizmów synchronizacji pęcherzy z dwóch sąsiadujących dysz. W pracy [5] eksperymentalnie badałem hydrodynamiczne oddziaływanie pomiędzy pęcherzami odrywającymi się z dwóch sąsiadujących dysz. **Wykonane badania pozwoliły mi na sformułowanie wniosków stanowiących nowy wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna:**

- **Układ składający się z dwóch dysz dąży do naprzemiennego lub synchronicznego odrywania się pęcherzy gazowy z tych dysz. Uzyskanie takiego sposobu odrywania się pęcherzy gazowych odbywa się dzięki oddziaływaniu hydrodynamicznemu pomiędzy pęcherzami, przy czym zmiany ciśnienia w jednej z dysz są periodyczne, a w drugiej mogą być chaotyczne.**
- **Wykazanie istnienia hydrodynamicznego oddziaływania pomiędzy pęcherzami i układami zasilania dyszy w gaz, z czego jeden układ zasilania jest układem determinującym częstotliwość odrywania się pęcherzy (ciśnienie podczas procesu wzrostu pęcherza fluktuuje ze stałą amplitudą i brak jest fluktuacji długookresowych), zaś drugi układ zasilania dyszy do niego się dopasowuje. Dopasowanie się częstotliwości odrywania się pęcherzy prowadzi do naprzemiennego ich odrywania się z dwóch sąsiadujących dysz. Dopasowanie się częstotliwości możliwe jest poprzez spadki ciśnienia o charakterze długookresowym w dyszy podrzędnej. Zaobserwowano również, że ciśnienie w dyszy sterującej (nadrzędnej) jest wyższe aniżeli w dyszy podrzędnej.**

W trakcie badań rejestrowano sygnały zmiany ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz i rejestrowano filmy zawierające proces oderwania i odlotu pęcherzy. W badaniach eksperymentalnych pęcherze generowano z mosiężnych dysz o średnicy wewnętrznej 1.1 mm, do cieczy o różnych właściwościach fizyko chemicznych: woda destylowana, olej silnikowy syntetyczny i olej silnikowy mineralny. W trakcie badań modyfikowana była odległość pomiędzy wylotami dysz, w przedziale 2 - 10 mm. Wykorzystanie cieczy o wyższej lepkości w stosunku do tej właściwości dla wody, spowodowało spowolnienie ruchu pęcherza dzięki czemu lepiej widoczne były procesy wpływające na dynamikę formowania się pęcherzy podczas ich hydrodynamicznego oddziaływania. Wyniki badań w cieczach typu olej silnikowy odniesiono do wyników badań w wodzie destylowanej. W trakcie prowadzenia badań za pomocą czujników ciśnienia rejestrowano fluktuacje ciśnienia w układzie

zasilającym dyszę w gaz, zaś za pomocą układu laser-fototranzystor rejestrowano częstotliwości odrywania się pęcherzy gazowych. W celu wykluczenia możliwości oddziaływania pneumatycznego pomiędzy układami zasilania (wspólne zasilanie) układy zostały odizolowane i zasilane z różnych źródeł. W trakcie badań modyfikowany był wydatek powietrza dostarczany do dysz. W trakcie rejestracji zmian ciśnienia w dyszy i częstotliwości odrywania się pęcherzy wydatek w dwóch dyszach był ustawiony na jednakowej wartości. Wydatek powietrza kontrolowano za pomocą rotametrów. Jednocześnie nagrywane były filmy pozwalające na weryfikację czy nie dochodzi do procesu łączenia się pęcherzy. Do analizy wyników badań eksperymentalnych wykorzystano analizy autokorelacji i analizy rekonstrukcji atraktorów 3D. Pozwoliły one na zbadanie stabilności naprzemiennego odrywania się pęcherzy gazowych i określenie periodycznego lub chaotycznego charakteru odrywania się pęcherzy w każdej z dysz. W pracy uzyskano, że najsilniejsze oddziaływanie hydrodynamiczne pomiędzy pęcherzami występowało dla odległości pomiędzy dyszami – 4 mm. Przy tym rozstawie nie dochodziło do koalescencji pęcherzy, więc wszelkie zaburzenia zmiany fluktuacji ciśnienia w dyszach, pomijając fluktuacje spowodowane samym procesem wzrostu i oderwania się pęcherza, były związane ze zmianami warunków ciśnienia i prędkości cieczy ponad dyszą, a nie procesem łączenia się pęcherzy.

Wyniki badań eksperymentalnych dotyczących hydrodynamicznego oddziaływania pomiędzy pęcherzami przedstawiono również w pracy [6]. Opisane wyniki pochodzą z badania eksperymentalnego opisanego w pracy [5]. Wyniki badań analizowano pod kątem odzyskania średnicy i trajektorii odrywających się pęcherzy. Odzyskano również częstotliwości odrywających się pęcherzy. **Wykonane analizy pozwoliły mi na wniesienie nowej wiedzy w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna, o określenie bezwymiarowego współczynnika (ABD), przy którym występuje naprzemienne odrywanie się pęcherzy gazowych.** Współczynnik ABD opracowałem w oparciu o liczbę Strohala. Podczas naprzemiennego odrywania się pęcherzy nie dochodzi do ich koalescencji. Współczynnik ABD uwzględnia: odległość pomiędzy dyszami, częstotliwość odrywania się pęcherzy (pojawienia się przepływu cieczy ponad dyszą) oraz prędkość rosnącego pęcherza. W przypadku gdy współczynnik ABD jest w zakresie $0.5 < ABD < 0.64$, występuje naprzemienne odrywanie się pęcherzy z dwóch sąsiadujących dysz i nie dochodzi do ich łączenia. Współczynnik może być używany podczas projektowania urządzeń napowietrzających np. wodę, w celu optymalizacji procesu wymiany masy pomiędzy cieczą i gazem. Ponadto zbadana została powtarzalność trajektorii odlatujących pęcherzy. Wykazano, że podczas naprzemiennego odrywania się pęcherzy gazowych (gdy występuje hydrodynamiczne oddziaływanie pomiędzy pęcherzami) trajektorie, dla kolejno odrywających się pęcherzy, są dużo bardziej podobne aniżeli przy braku występowania tego oddziaływania.

Wykonane i opisanie powyżej wyniki badań pozwoliły na wykonanie badań eksperymentalnych, w których badano możliwość modyfikacji charakteru odrywania się pęcherzy gazowych w jednej z dysz, poprzez zmianę częstotliwości odrywania się pęcherzy w drugiej dyszy. Wyniki badań przedstawiono w pracy [7] i **pozwoliły mi one na sformułowanie wniosków stanowiących nowy wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna:**

- Pomimo stałego natężenia przepływu powietrza w jednej z dysz, zmieniała się częstotliwość odrywania się pęcherzy, reagując na zmianę objętościowego natężenia przepływu w sąsiedniej dyszy. Wahania częstotliwości odrywania się pęcherzy były powiązane z interakcją pomiędzy pęcherzami i system zasilania dyszy w gaz.
- Występowanie oddziaływania hydrodynamicznego nieznacznie wydłuża czas wzrostu pęcherza, a znacząco modyfikuje czas oczekiwania na pojawienie się pęcherza. Oznacza to, że oddziaływanie hydrodynamiczne modyfikuje proces zachodzący w systemie zasilania dyszy w gaz, co jest widoczne przez zmiany głębokości penetracji dyszy cieczą w kolejnych cyklach odrywania się pęcherzy. W konsekwencji można stwierdzić, że zsynchronizowane lub naprzemienne odrywanie się pęcherzy, powstające na skutek oddziaływania hydrodynamicznego, w większym stopniu jest możliwe poprzez modyfikację czasu oczekiwania na pojawienie się pęcherza, a w mniejszym stopniu przez czas wzrostu pęcherzy.
- Oddziaływanie hydrodynamiczne pomiędzy pęcherzami, a układem zasilania dyszy w gaz może być wykorzystane do kontrolowania procesu odrywania się pęcherzy z kilku dysz.
- Proces odrywania się pęcherzy gazowych z dysz, ma tendencję do samoorganizacji poprzez modyfikację częstotliwości odrywania się pęcherzy, a co za tym idzie modyfikację warunków hydrodynamicznych ponad dyszami.

W wykonanych badaniach, zmiana częstotliwości odrywania się pęcherzy gazowych, w jednej z dysz, modyfikowała warunki hydrodynamiczne ponad sąsiednią dyszą. Na podstawie wcześniej wykonanych badań dobrano odległość pomiędzy wylotami dysz i wynosiła ona 4 mm (przy tej odległości zaobserwowano najsilniejsze oddziaływanie pomiędzy pęcherzami). Zmiana częstotliwości odrywania się pęcherzy realizowana była poprzez zmianę wydatku powietrza dostarczanego do dyszy. W jednej z dysz wydatek ustawiony został na stałej wartości (np. $q = 0.00632$ l/min). Wartość wydatków powietrza dobrano, tak aby widoczny był proces zalewania dyszy cieczą, w celu odzyskania czasu oczekiwania na pojawienie się pęcherza i czasu wzrostu pęcherza. W drugiej dyszy wydatek był modyfikowany, za pomocą zaworu, w zakresie 0.00492–0.0424 l/min. Wydatki powietrza dostarczanego do dyszy kontrolowano za pomocą rotametrów. W trakcie badań rejestrowano sygnały zmiany ciśnienia w układach zasilających dysze w gaz i rejestrowano filmy zawierające procesy wzrostu pęcherzy oraz proces zalewania dyszy cieczą. Za pomocą własnoręcznie wykonanego programu komputerowego odzyskiwano szeregi czasowe zmian głębokości zalania dyszy cieczą, w kolejnych cyklach odrywania się pęcherzy. Dane z czujników ciśnień i szeregi czasowe zmiany głębokości zalania dyszy cieczą zostały ze sobą zsynchronizowane. Szeregi czasowe zostały również poddane analizom: FFT (odzyskanie częstotliwości odrywania się pęcherzy gazowych), rekonstrukcji atraktorów 3D (w celu sprawdzenia powtarzalności procesów) oraz dekompozycji falkowej (w celu sprawdzenia występowania oddziaływania, na podstawie występowania składowej częstotliwościowej o częstotliwości odrywania się pęcherzy gazowych z sąsiedniej dyszy).

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawionych w pracy [7] zostały zweryfikowane za pomocą nadań numerycznych. Wyniki badań numerycznych przedstawiłem w pracy [8].

Wyniki badań stanowią nowy wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna:

- **Sterowanie procesem odrywania się pęcherzy może być realizowany poprzez modyfikację warunków hydrodynamicznych ponad dyszą, ponieważ zmiany prędkości cieczy nad dyszą modyfikują warunki w układzie zasilania dyszy w gaz.**
- **Zmiany warunków ciśnieniowych w układzie zasilania dyszy w gaz odpowiadają zmianom o okresowym lub chaotycznym charakterze odrywania się pęcherzy (widocznych w szeregach czasowych zalewania dyszy cieczą). W zależności od występujących zaburzeń zmienia się głębokość penetracji dyszy cieczą oraz częstotliwość odrywania się pęcherzy.**

Do modelowania hydrodynamicznego oddziaływania wykorzystałem model wzrostu pęcherzy i ruchu cieczy wewnątrz dyszy. Model wykonałem w programie SCILAB. W modelu, na etapie wzrostu pęcherzyków uwzględniłem proces izotermiczny, a wzrost pęcherzyków opisałem równaniem Rayleigha-Plesseta. Natężenie przepływu powietrza dostarczanego do pęcherzyka, przez dyszę, opisałem równaniem Hagena-Poiseuille'a oraz uwzględniłem zmiany ciśnienia w układzie zasilania dyszy w gaz. Model zawierał następujące siły działające na pęcherz, podczas jego wzrostu: siłę oporu, siłę wyporu, siłę napięcia powierzchniowego, siłę pochodzącą od masy cieczy wokół pęcherza i moment pędu gazu. Etap oczekiwania na pojawienie się pęcherza, uwzględniający proces zalewania dyszy cieczą, opisałem za pomocą równania ruchu środka masy cieczy i uwzględniłem siłę pochodzącą od zmian ciśnienia w układzie zasilania dyszy w gaz oraz oporu cieczy uczestniczącej w zalewaniu dyszy cieczą. Model numeryczny zawierał składową prędkości cieczy - pozwalającą na jej modyfikację i częstotliwości występowania zaburzeń przepływu cieczy nad dyszą. Zaburzenia aproksymowałem okresową funkcją sinus, bazując na wynikach eksperymentów przedstawionych pracy [4].

Przedstawiony model numeryczny może być wykorzystany do badania interakcji pomiędzy pęcherzami i układami zasilania dysz w gaz podczas odrywania się pęcherzy z dwóch sąsiadujących dysz, gdyż interakcja ta związana jest z zaburzeniami przepływu cieczy ponad dyszą.

2.3.3. Wnioski z wykonanych badań

W trakcie prowadzenia badań i analizy ich rezultatów, zauważyłem, że proces zalewania dyszy cieczą jest odzwierciedleniem zarówno zaburzeń zachodzących w układzie zasilającym dysze w gaz, jak również zaburzeń przepływu cieczy wokół dyszy, z której generowane są pęcherze. Wykonane badania były czynnikiem, który pozwolił na sformułowanie hipotezy *modyfikacja warunków hydrodynamicznych ponad dyszą pozwala na otrzymanie periodycznego procesu odrywania się pęcherzy oraz zapobieganie łączeniu się pęcherzy podczas ich odlotu z sąsiadujących dysz.*

Do weryfikacji hipotezy pomocne mi były rekonstrukcje szeregów czasowych zmiany głębokości zalania dyszy cieczą, dla kolejnych cykli odrywania się pęcherzy gazowych.

Szeregi te pozwalają na jednoznaczne określenie czasów wzrostu pęcherza, czy czasu oczekiwania na jego pojawienie. Odzyskiwanie czasu oczekiwania na pojawienie się pęcherza na podstawie szeregów czasowych fluktuacji ciśnienia w układzie zasilania dyszy było niejednoznaczne. W pierwszym etapie badań weryfikowane były czynniki wpływające na proces penetracji dyszy cieczą. O ile wpływ wysokości słupa cieczy ponad otworem w płycie, gęstości cieczy, wydatku powietrza czy objętości układu zasilania dyszy w gaz na oscylacje menisku w otworze było zbadane, co można było zaadoptować do badań nad procesem zalewania dyszy cieczą, o tyle brak było wyników badań wpływu siły napięcia powierzchniowego na stabilność tego procesu. Ponadto proces zalewania dysz cieczą podczas odrywania się pęcherzy gazowych nie był badany jednocześnie z fluktuacjami ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz. W związku z tym wykonano badania pozwalające na badanie stabilności procesu zalewania dyszy cieczą i odrywania się pęcherzy dla wody o zmodyfikowanych wartościach siły napięcia powierzchniowego. Równolegle prowadzone były badania nad oddziaływaniem pomiędzy pęcherzami odrywającymi się z dwóch sąsiadujących dysz. Badania pozwoliły na określenie czynników prowadzących do naprzemiennego odrywania się pęcherzy, bez koalescencji pęcherzy. Określenie wpływu parametrów takich jak odległość pomiędzy dyszami, częstotliwość odrywania się pęcherzy oraz prędkość rosnących pęcherzy na hydrodynamiczne oddziaływanie pomiędzy nimi, pozwoliło na zaproponowanie bezwymiarowego współczynnika określającego występowanie naprzemiennego odrywania się pęcherzy gazowych z dwóch sąsiadujących dysz. Zbadanie procesu penetracji dyszy cieczą oraz określenie współczynnika występowania oddziaływania pozwoliło na wykonanie badań, w których potwierdzono eksperymentalnie i numerycznie możliwość uzyskania periodycznego odrywania się pęcherzy gazowych poprzez modyfikacje warunków hydrodynamicznych ponad dyszą. Uzyskując periodyczną naturę procesu odrywania się pęcherzy gazowych można kontrolować ten proces, tak aby nie dochodziło do łączenia się pęcherzy w urządzeniach technicznych np. napowietrzaczach wody. Poznanie mechanizmów prowadzących do kontrolowania periodyczności odrywania się pęcherzy, jest istotnym wkładem w badania prowadzone nad dynamiką odrywania się pęcherzy gazowych.

Opisane we wcześniejszym rozdziale elementy nowości naukowych stanowiących wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna (opublikowane w pracach wskazanych do dzieła) pozwoliły na wyróżnienie głównych osiągnięć naukowych. Takim, osiągnięciem naukowym jest przede wszystkim rozwój metodyki kompleksowego badania procesu odrywania się pęcherzy gazowych na podstawie zsynchronizowanych szeregów czasowych zmiany ciśnienia w układzie zasilania dyszy w gaz i filmów rejestrowanych za pomocą kamery do szybkiej fotografii. Zsynchronizowanie tych danych pozwoliło na zbadanie wpływu niewielkich zmian siły napięcia powierzchniowego oraz zmiany warunków hydrodynamicznych na proces formowania się pęcherzy gazowych – w trakcie formowania się pęcherzy gazowych z pojedynczej dyszy. Zdobyta w tym aspekcie wiedza pozwoliła również na wniesienie nowej wiedzy w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna w aspekcie oddziaływania pomiędzy pęcherzami gazowymi. Pokazano, że oddziaływanie hydrodynamiczne pomiędzy pęcherzami gazowymi odrywającymi się z dwóch sąsiadujących dysz i oddziaływanie pomiędzy pęcherzami, a systemami zasilającymi dyszę w gaz mogą

prorowadzić do zmiany periodycznej bądź chaotycznej natury odrywania się pęcherzy gazowych. W konsekwencji potwierdzono hipotezę mówiącą, że *modyfikacja warunków hydrodynamicznych ponad dyszą pozwala na otrzymanie periodycznego procesu odrywania się pęcherzy oraz zapobieganie łączeniu się pęcherzy podczas ich odlotu z sąsiadujących dysz, co również stanowi nowy wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.*

Podsumowując, nowymi osiągnięciami naukowymi stanowiącymi wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna są:

- **Opracowanie metodologii badań procesu odrywania się pęcherzy gazowych poprzez badanie zjawisk zachodzących w dyszy, czyli szeregów czasowych zmiany głębokości zalania dyszy cieczą w kolejnych cyklach odrywania się pęcherzy gazowych.**
- **Analiza wyników badań dynamiki odrywania się pęcherzy gazowych na podstawie zsynchronizowanych szeregów czasowych zmiany głębokości zalania dyszy cieczą i szeregów czasowych fluktuacji ciśnienia w układzie zasilającym dyszę w gaz.**
- **Wykorzystanie metod nieliniowej analizy danych do badania szeregów czasowych, zmiany głębokości zalania dyszy cieczą oraz fluktuacji ciśnienia w układzie zasilania dyszy w gaz, rejestrowanych podczas odrywania się pęcherzy gazowych.**
- **Odzyskiwanie czasów formowania się pęcherzy na podstawie szeregów zmiany głębokości zalania dyszy cieczą oraz analiza tych szeregów.**
- **Określenie bezwymiarowego współczynnika (*ABD*), przy którym występuje naprzemienne odrywanie się pęcherzy gazowych.**

Zdobyta nowa wiedza może zostać wykorzystana do dalszych badań związanych z procesem formowania się kolumny pęcherzy lub w zastosowaniach inżynierskich, w szczególności pracach badawczo rozwojowych urządzeń, w których występuje przepływ pęcherzykowy. Wyniki prac naukowych wykorzystalem do zastosowań badawczo rozwojowych urządzeń inżynierskich. W obecnych czasach istnieje ogromny problem z niskoenergetycznym procesem napowietrzania wód. Napowietrzenie wody ma wpływa na możliwość bytowania organizmów żywych oraz możliwość wykorzystania jej do celów konsumpcyjnych czy przemysłowych. W dobie rozwijającego się rolnictwa, wiele wód zanieczyszczonych jest związkami azotu i fosforu. Skuteczne oczyszczanie wody realizowane jest poprzez jej napowietrzanie czyli utlenianie tych związków. W celu wydajnego napowietrzania wody, generowane pęcherze powinny być możliwie najmniejsze i nie może dochodzić do ich koalescencji. Ponadto pęcherze nie mogą być generowane w skali nano, gdyż pęcherze te dostając się do skrzelu ryb i ich krwi powodując choroby i śnięcie tych organizmów. Mając na względzie wszystkie te fakty, współpracowałem przy rozwiązaniu konstrukcyjnym generatora mikro pęcherzy, którego wydajność (*SAE*) wyniosła około 6-8 kgO₂/kWh. W związku z dalszym rozwijaniem tego urządzenia na obecnym etapie

rozwiązanie nie zostało dokładnie opisane, gdyż istnieją przesłanki do zgłoszenia wniosku patentowego. Składane są wnioski o finansowanie projektu na dalszy rozwój do instytucji NCBiR oraz PARP. Standardowe urządzenia obecnie stosowane do napowietrzania wody posiadają wydajność SAE w zakresie 1.5 – 6 kgO₂/kWh.

Ponadto, na podstawie wykonanych badań, opracowano generator nano/mikro pęcherzy, którego rozwiązanie konstrukcyjne zostało zgłoszone do urzędu patentowego pod numerem P.441609 z dn. zgłoszenia 30.06.2022. W założeniu konstrukcyjnym rozdrobnienie pęcherzy realizowane jest na trzy sposoby: wielkość otworów, z których są one generowane, wymuszanie przepływu cieczy ponad otworami oraz wibrującą membranę, w której są umieszczone otwory do generowania pęcherzy. Dodatkowo wymuszanie przepływu cieczy ponad otworami oraz wibracje membrany zapobiegają łącznie się pęcherzy po ich oderwaniu.

2.3.4. Wykaz cytowanej literatury

[P1] Han, L., Al-Dahhan, M.H.: Gas–liquid mass transfer in a high pressure bubble column reactor with different sparger designs. *Chem. Eng. Sci.* 62 (2007), 131–139.

[P2] Hosoda, S., Abe, S., Hosokawa, S., Tomiyama, A.: Mass transfer from a bubble in a vertical pipe. *Int. J. Heat Mass Tran.* 69 (2014), 215–222.

[P3] Zhang, L.H., Li, Z.J., Yang, N., Jiang, B., Cong H.F., Zhang Z.H.: Hydrodynamics and mass transfer performance of vapor–liquid flow of orthogonal wave tray column. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 63 (2016), 6–16.

[P4] Budzyński, P., Gwiazda, A., Dziubiński, M.: Intensification of mass transfer in a pulsed bubble column. *Chem Eng Proc - Process Intensification* 112 (2017), 18-30.

[P5] Suwartha, N., Syamzida, D., Priadi, C.R., Moersidik, S.S., Ali F.: Effect of size variation on microbubble mass transfer coefficient in flotation and aeration processes. *Heliyon* 6 (2020), (4):e03748.

[P6] Machova, J., Faina, R., Randak, T., Valentova, O., Steinbach, C., Kocour Kroupova, H., Svobodova, Z.: Fish death caused by gas bubble disease: a case report. *Vet Med - Czech* (2017), 62(4):231-237.

[P7] Leifer, I., Tang, D.: The acoustic signature of marine seep bubbles. *J. Acoust. Soc. Am.* 121 (2007), 35–40.

[P8] He, Y., Zhang, T., Lv, L., Tang, W., Wang, Y., Zhou, J., Tang S.: Application of microbubbles in chemistry, wastewater treatment, medicine, cosmetics, and agriculture: a review. *Env. Chem. Lett.* 21(2023), 3245–3271.

- [P9] Le, T.H., Phan, A.H.T., Le, K.C.M., Phan, T.D.U., Nguyen, K.T.: Utilizing polymer-conjugate albumin-based ultrafine gas bubbles in combination with ultra-high frequency radiations in drug transportation and delivery. *RSC Adv* 11(2021), (55) 34440–34448.
- [P10] Pan, F., Mu, L., He, Y., Wang, C., Zhou, S.: A thermal-hydrodynamic coupling method for simulating the interplay between bubble departure and wall temperature variation in nucleate boiling. *J Hydrodynamics* 33 (2021), 243–258.
- [P11] Yuan, J., Ye, X., Shan, Y.: Modeling of the bubble dynamics and heat flux variations during lateral coalescence of bubbles in nucleate pool boiling. *Int J Multiphase Flow* 142 (2021), 103701.
- [P12] Ruzicka, M.C., Bunganic, R., Drahoš, J.: Meniscus dynamics in bubble formation. Part I: Experiment. *Chem Eng Res Des* 87 (2009), 1349-1356.
- [P13] Ruzicka, M.C., Bunganic, R., Drahoš, J.: Meniscus dynamics in bubble formation. Part II: Model. *Chem Eng Res Des* 87 (2009), 1357–1365.
- [P14] Stanovsky, P., Ruzicka, M., Martins, A., Teixeira, J.: Meniscus dynamics in bubble formation: A parametric study. *Chem Eng Sci* 66 (2011), 3258-3267.
- [P15] Dzienis, P., Mosdorf, R.: Stability of periodic bubble departures at a low frequency. *Chem Eng Sci* 109 (2014), 171–182.
- [P16] Mosdorf, R., Dzienis, P., Litak, G.: The loss of synchronization between air pressure fluctuations and liquid flow inside the nozzle during the chaotic bubble departures. *Meccanica* 52 (2017), 2641–2654.
- [P17] Cano-Lozano, J.C., Bolaños-Jiménez, R., Gutiérrez-Montes, C., Martínez-Bazán, C.: On the bubble formation under mixed injection conditions from a vertical needle. *Int J Multiphase Flow* 97 (2017), 23–32.
- [P18] Dupre, V., Ponasse, M., Aurelle, Y., Secq, A.: Bubble formation by water release in nozzles I. Mechanisms. *Wat Res* vol 32 (8) (1998), 2491-2497.
- [P19] Lunde, K., Perkins, R.J.: Shape Oscillations of Rising Bubbles. *Appl Sci Res* 58 (1997), 387–408.
- [P20] Luo, Y., Wang, Z., Zhang, B., Guo, K., Zheng, L., Xiang, W., Liu, H., Liu, C.: Experimental study of the effect of the surfactant on the single bubble rising in stagnant surfactant solutions and a mathematical model for the bubble motion. *Ind Eng Chem Res* 61 (2022), 9514–9527.

[P21] Puncochar, M., Ruzicka, M.C., Simcik, M.: Bubble formation and deformation. *Chem Eng Sci* 260 (2022), 117729.

[P22] Li H.Z., Mouline, Y., Funfschilling, D., Marchal, P., Choplin, L., Midoux, N.: Evidence for in-line bubble interactions in non-Newtonian fluids. *Chem Eng Sci* 53 (12) (1998), 2219–2230.

[P23] Ruzicka, M.C.: On bubbles rising in line. *Int J Multiphase Flow* 26 (7) (2000), 1141–1181.

[P24] Baz-Rodriguez, S.A., Ramirez-Munoz, J., Soria, A.: In-line interaction between two spherical particles due to a laminar wake effect. *Int. J. Multiph. Flow* 39 (2012), 240–244

[P25] Baz-Rodríguez, S.A., Ramírez-Muñoz, J., Soria, A., Sacramento-Rivero, J.C.: Hydrodynamic interaction of two spherical bubbles rising in-line: a semi-analytical approach. *Chem Eng Com* 201 (5) (2014), 674–687.

[26] Nicklas, J., Ditscherlein, L., Peuker, U.A.: Particle–Bubble Interactions: an Investigation of the Three-Phase Contact Line by Atomic Force Microscopy, *Langmuir* 39 (2023), 13630–13640.

[27] Li, X., Wang, W., Zhang, P., Li, J., Chen, G.: Interactions between gas–liquid mass transfer and bubble behaviours. *R Soc Open Sci* 6(5) (2019), 190136.

[P28] Capponi, A., Llewellyn, E.W.: Experimental observations of bubbling regimes at in-line multi-orifice bubblers. *Int J Multiphase Flow* (2019), 114 66–81.

[P29] Padash, A., Chen, B., Boyce, C.M.: Characterizing alternating bubbles emerging from two interacting vertical gas jets in a liquid. *Chem Eng Sci* 248 Part B (2022), 117199.

[P30] Kazakis, N.A., Mouza, A.A., Paras, S.V.: Coalescence during bubble formation at two neighbouring pores: an experimental study in microscopic scale. *Chem Eng Sci* 63(21) (2008), 5160–5178.

[P31] Legendre, D., Magnaudet, J., Mougin, G.: Hydrodynamic interactions between two spherical bubbles rising side by side in a viscous liquid. *J Fluid Mech* 497 (2003), 133–166.

[P32] Sanada, T., Sato, A., Shiota, M.T. Watanabe, M.: Motion and coalescence of a pair of bubbles rising side by side. *Chem Eng Sci* 64 (2009), 2659–2671.

[P33] Mosdorf, R., Wyszowski, T.: Self-Organising Structure of Bubbles Departures, *Int J Heat Mass Transf* 61 (2013), 277–286.

- [P34] Feng, X., Kunugi, T., Qin, S., Wu, D.: Flowrate effects on the lateral coalescence of two growing bubbles. *The Can J Chem Eng* (2023), doi.org/10.1002/cjce.24976 (2023).
- [P35] Yuan, J., Ye, X., Shan, Y.: Modelling of double bubbles coalescence behaviour on different wettability walls using LBM method. *Int J Thermal Sciences* 168 (2021), 107037.
- [P36] Santos, D.B.V., Oliveira, G.P., Mangiavacchi, N., Valluri, P., Anjos, G.R.: Numerical Investigation of Gas Bubble Interaction in a Circular Cross-Section Channel in Shear Flow. *Fluids* 9 (32) (2024).
- [P37] Tomiyama, A., Celata, G.P., Hosokawa, S., Yoshida S.: Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime. *Int J Multiphase Flow* 28(9) (2002), 1497-1519.
- [P38] Maldonado, M., Quinn, J.J., Gomez, C.O., Finch, J.A.: An experimental study examining the relationship between bubble shape and rise velocity. *Chem Eng Sci* 98 (2013), 7-11.
- [P39] Liu, L., Yan, H., Zhao, G.: Experimental studies on the shape and motion of air bubbles in viscous liquids. *Exp Thermal Fluid Sci* 62 (2015), 109-121.
- [P40] Aoyama, S., Hayashi, K., Hosokawa, S., Tomiyama, A.: Shapes of ellipsoidal bubbles in infinite stagnant liquids, *Int J Multiphase Flow* 79 (2016), 23-30.
- [P41] Sherman, H.; Nguyen, A. V.; Bruckard, W.: An analysis of bubble deformation by a sphere relevant to the measurements of bubble-particle contact interaction and detachment forces. *Langmuir* 32 (46) (2016), 12022– 12030.
- [P42] Hayashi, K., Hessenkemper, K., Lucas, D., Legendre, D., Tomiyama, A.: Scaling of lift reversal of deformed bubbles in air-water systems. *Int J Multiphase Flow* 142 (2021), 103653.
- [P43] Zenit, R., Magnaudet, J.: Measurements of the streamwise vorticity in the wake of an oscillating bubble. *Int J Multiphase Flow* 35(2) (2009), 195-203.
- [P44] Jha, N.K., Govardhan, R.N.: Interaction of a vortex ring with a single bubble: bubble and vorticity dynamics. *J Fluid Mech* 773 (2015), 460-497.
- [P45] Reuter, F., Gonzalez-Avila, S.R., Mettin, R., Ohl, C.D.: Flow fields and vortex dynamics of bubbles collapsing near a solid boundary. *Phys Rev Fluids* 2 (2017), 064202.
- [P46] Zhang, J., Ni M.J.: What happens to the vortex structures when the rising bubble transits from zigzag to spiral? *J Fluid Mech* 828 (2017), 353-373.

- [P47] Bolaños-Jiménez, R., Rossi, M., Rivas, D.F., Kähler, C.J., Marin, A.: Streaming flow by oscillating bubbles: Quantitative diagnostics via particle tracking velocimetry. *J Fluid Mech* 820 (2017), 529–548.
- [P48] Koch, M., Lauterborn, W., Lechner, C., Mettin, R.: ring vortex dynamics following jet formation of a bubble expanding and collapsing close to a flat solid boundary visualized via dye advection in the framework of open foam. *Fluids* 8 (2023), 200.
- [P49] Zhang, L, Deng J, Shao, X.: Modification of flow transition for a vortex ring by a bubble released at the axis. *J Fluid Mech* 967 (2023), 28.
- [P50] Ortiz-Villafuerte, J., Schmidl, W., Hassan, Y.A.: Rocking motion, trajectory and shape of bubbles rising in small diameter pipes. *Exp Thermal Fluid Sci* 25(1–2) (2001), 43-53.
- [P51] Mougin, G., Magnaudet J.: Wake-induced forces and torques on a zigzagging/spiralling bubble. *J Fluid Mech* 567 (2006), 185-194.
- [P52] Pruthvik, A., Satish R., Kandlikar, G.: Bubble growth and departure trajectory under asymmetric temperature conditions. *Int J Heat Mass Transf* 95 (2016), 824-832.
- [P53] Augustyniak, J., Perkowski, D.M., Mosdorf, R.: Measurement of multifractal character of bubble paths using image analysis. *Int Comm Heat Mass Transfer* 117 (2020), 104701.
- [P54] Augustyniak, J., Perkowski, D.M.: Compound analysis of gas bubble trajectories with help of multifractal algorithm, *Exp Thermal Fluid Sci* 124 (2021), 110351.
- [P55] Yang, B., Jafarian, M., Freidoonimehr, N., Arjomandi, M.: Trajectory of a spherical bubble rising in a fully developed laminar flow. *Int J Multiphase Flow* 157 (2022), 104250.
- [P56] Zun, I., Groselj, J.: The structure of bubble non-equilibrium movement in free-rise and agitated-rise conditions. *Nucl Eng Des* 163 (1996), 99–115.
- [P57] Zhang, L., Shoji, M.: Aperiodic bubble formation from a submerged orifice. *Chem Eng Sci* 56 (2001), 5371–5381.
- [P58] Mosdorf, R., Shoji, M.: Chaos in bubbling—nonlinear analysis and modelling. *Chem Eng Sci* 58 (2003), 3837–3846.
- [P59] Cieslinski, J.T., Mosdorf, R.: Gas bubble dynamics—experiment and fractal analysis. *Int J Heat Mass Transf* 48 (2005), 1808–1818.
- [P60] Antoniadis, D., Matzavinos, D., Stamatoudis, M.: Effect of chamber volume and diameter on bubble formation at plate orifices. *Chem Eng Res Des* 70 (1992), 161–165.

[P61] Liu, Z., Zheng, Y., Jia, L., Zhang, O.: Study of bubble induced flow structure using PIV, Chem Eng Sci 60(13) (2005), 3537-3552.

[P62] Cerqueira, R.F.L., Paladino, E.E., Ynumaru, B.K., Maliska, C.R.: Image processing techniques for the measurement of two-phase bubbly pipe flows using particle image and tracking velocimetry (PIV/PTV). Chem Eng Sci 189 (2018), 1-23.

[P63] Dzienis, P., Mosdorf, R., Tomaszuk, D., Suchecki, W.: Formation of bubble chains over twin nozzles. MATEC Web of Conferences 240 (2018), 1-5.

[P64] Dzienis, P., Mosdorf, R.: Synchronization of data recorded using acquisition stations with data from camera during the bubble departure. Adv Sci Technology, Res J 7(20) (2013), 29-34.

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

Od 2015 r. współpracuję z prof. dr. hab. inż. Grzegorzem Litakiem, pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Współpraca dotyczy wykorzystywania metod nieliniowej analizy danych do badania sygnałów czasowych. W ramach współpracy opublikowano dwie prace w formie publikacji naukowych:

Mosdorf, R., **Dzienis, P.**, Litak, G.: The loss of synchronization between air pressure fluctuations and liquid flow inside the nozzle during the chaotic bubble departures. *Meccanica* 52 (2017), 2641-2654,

Rafałko, G., Grzybowski, H., **Dzienis, P.**, Zaborowska, I., Mosdorf, R., Litak, G.: Recurrence analysis of phase distribution changes during boiling flow in parallel minichannels, *Eur Phys J Spec Top* (2022), <https://doi.org/10.1140/epjs/s11734-022-00741-0>.

W okresie od 27.06.2022 r do 27.07.2022 r. odbyłem staż naukowy na Wydziale Mechanicznym Wileńskiego Uniwersytetu Technicznego im. Giedymina. Tematyka stażu dotyczyła badania hydrodynamicznego oddziaływania pomiędzy układami zasilania dyszy w gaz podczas odrywania się pęcherzy gazowych.

Do głównych zadań należało:

- opracowanie systemu zasilania dysz w gaz,
- nadzór nad badaniami i przeprowadzenie badań doświadczalnych hydrodynamicznego oddziaływania pomiędzy układami zasilania dysz w gaz, podczas odrywania się pęcherzy z dwóch dysz,
- opracowanie i analiza wyników badań doświadczalnych.

Wykonane badania pozwoliły na przygotowanie publikacji naukowej:

Dzienis, P., Golak, K., Konopka, M., Mosdorf, R., Bazienė, K., Gargasas, J.: A hydrodynamic interaction between bubbles and gas supply system during gas bubble departures in liquids: an experimental study. *Sci Rep* 13 (2023), 17979.

Ponadto po odbyciu stażu przygotowaliśmy wspólnie pracę:

Gargasas, J., Baziene, K., **Dzienis, P.**: Low energy buildings: multifunctional strategies and solutions. *Entrepreneurship and Sustainability Issues* 11(2) (2023), 314-330.

W roku 2022 nawiązałem współpracę z pracownikami Uniwersytetu Medycznego w Białymstoku, dotyczącą optymalizacji urządzenia wykorzystywanego do badania stopnia zwiotczenia mięśni podczas zabiegów anestetycznych metodą ToF. W ramach współpracy powstała publikacja naukowa:

Kosciuczuk, U., Dardzinska, A., Kasperczuk, A., **Dzienis, P.**, Tomaszuk, A., Tarnowska, K., Rynkiewicz-Szczepanska, E., Kossakowska, A., Pryzmont, M.: Practice Guidelines for Monitoring Neuromuscular Blockade—Elements to Change to Increase the Quality of Anesthesiological Procedures and How to Improve the Acceleromyographic Method. *J. Clin. Med.* 13 (2024), 1976. <https://doi.org/10.3390/jcm13071976>.

Obecnie przygotowwany jest wniosek zgłoszenia ochrony patentowej opracowanego rozwiązania konstrukcyjnego.

Nawiązałem również współpracę naukową z pracownikami Politechniki Lubelskiej: dr hab. inż. Arkadiuszem Sytą i dr inż. Bartłomiejem Ambrożkiewiczem oraz z pracownikami Chemnitz University of Technology: profesor Olfa Kanoun i Ghada Bouattour, w zakresie badania uszkodzeń silników bezzałogowych statków powietrznych z wykorzystaniem elementów piezoelektrycznych i metod nieliniowej analizy danych. Wynikiem współpracy jest wydanie publikacji naukowej:

Koszewnik, A., Ambroziak, L., Ołdziej, D., **Dzienis, P.**, Ambrożkiewicz, B., Syta, A., Bouattour, G., Kanoun, O.: Nonlinear recurrence analysis of piezo sensor placement for unmanned aerial vehicle motor failure diagnosis, Scientific Reports 14, (2024) 8289.

Nawiązanie współpracy z profesorem Vikramem Pakrashi - University College Dublin, w zakresie badania uszkodzeń silników bezzałogowych statków powietrznych z wykorzystaniem elementów piezoelektrycznych i metod nieliniowej analizy danych. Wynikiem współpracy jest wydanie publikacji naukowej:

Ambrożkiewicz, B., **Dzienis, P.**, Ambroziak, L., Koszewnik, A., Syta, A., Ołdziej, D., Pakrashi, V.: Diagnostics of Unmanned Aerial Vehicle with recurrence based approach of piezo-element voltage signals, Scientific Reports 14, (2024) 17211.

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

W latach 2007 – 2015 byłem członkiem zaś w latach 2015 – 2021 byłem opiekunem Koła Naukowego Mechaniki i Informatyki Stosowanej. Od 2008 do 2012 roku brałem udział w organizacji zawodów latających modeli halowych dla dzieci oraz dorosłych. W trakcie pełnienia opieki nad kołem, członkowie koła naukowego brali czynny udział w konkursach. Wspierałem merytorycznie studentów w trakcie przygotowywania prac, między innymi na kolejne edycje Studenckiego Konkursu Projektowego Solidworks (organizowanego przez DPS Software). Pod moją opieką 3 projekty zostały nagrodzone.

Od wielu lat jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej. Od roku 2020 pełnię funkcję sekretarza Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej o. Białystok. W dn. 22-25.03.2017 PTMTS i Politechnika Białostocka były organizatorami konferencji - XII Konferencja „Nowe kierunki rozwoju mechaniki”, odbywającej się w Supraślu. Udzielałem się w Komitecie organizacyjnym konferencji, pełniąc funkcję sekretarza.

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora pełniłem rolę **promotora pomocniczego** w otwartym przewodzie doktorskim dr inż. Gabrieli Rafałko. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Zastosowanie analizy obrazu do identyfikacji struktur przepływu wielofazowego oraz badania ich dynamiki*. Praca została obroniona dn. 01.09.2023. Uchwałą Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej z dn. 20.09.2023 Pani Gabriela Rafałko uzyskała tytuł doktora nauk technicznych. Ponadto po uzyskaniu stopnia doktora byłem promotorem w 61 zakończonych pracach dyplomowych (41 pracach inżynierskich i 20 prac magisterskich). Prace dyplomowe broniły na kierunkach, przede wszystkim: mechanika i budowa maszyn, automatyka i robotyka, mechatronika, inżynieria biomedyczna i ekoenergetyka. Ponadto byłem recenzentem 29 prac inżynierskich i magisterskich obronionych na Wydziale Mechanicznym PB.

Od października 2023 r. jestem czynnym członkiem Wydziałowej Komisji ds. Jakości Kształcenia oraz Uczelnianej Komisji ds. Jakości Kształcenia. W trakcie swojej kariery zawodowej niejednokrotnie byłem członkiem komisji ds. tworzenia lub modernizacji kierunków nauczania: *mechanika i budowa maszyn* i *mechatronika*. Jestem autorem i współautorem planów kształcenia z przedmiotów np.: *grafika inżynierska II*, *komputerowe wspomaganie projektowania*, *zaawansowane systemy CAx*, *zaawansowane techniki komputerowo wspomagane projektowania*. Przedmioty te są lub były prowadzone na kierunkach: *automatyka i robotyka*, *ekoenergetyka*, *mechanika i budowa maszyn* czy *mechatronika*. Dodatkowo przedmiot *zaawansowane systemy CAx* znajduje się w ofercie przedmiotów dostępnych w ramach programu Erasmus +.

Uczestniczę w przedsięwzięciach organizowanych w ramach międzynarodowego programu Erasmus +. W dniach 13 – 17.02.2023 prowadziłem zajęcia studentom zagranicznym na Wydziale Mechanicznym Wileńskiego Uniwersytetu Technicznego im. Giedymina. Temat zajęć: *Parametric design in CAD systems*. W dniach 08 – 12.04.2024 uczestniczyłem w

programie BIP i prowadziłem zajęcia studentom zagranicznym na Wydziale Mechanicznym Wileńskiego Uniwersytetu Technicznego im. Giedymina. Prowadzono zajęcia z zakresu modelowania w systemach CAD.

Do osiągnięć dydaktycznych i popularyzujących naukę należy również dodać prowadzenie przedmiotów na kierunkach: *automatyka i robotyka, ekoenergetyka, mechanika i budowa maszyn i mechatronika*.

Przedmioty prowadzone w j. polskim:

- *technologia informacyjna* – zajęcia projektowe,
- *podstawy informatyki* – zajęcia projektowe,
- *metody komputerowe w mechanice* – zajęcia wykładowe i projektowe – koordynator przedmiotu,
- *komputerowe wspomaganie projektowania* – zajęcia wykładowe i projektowe – koordynator przedmiotu,
- *zaawansowane systemy CAx* – zajęcia wykładowe i projektowe – koordynator przedmiotu,
- *wytrzymałość materiałów* – zajęcia laboratoryjne.

Przedmioty prowadzone w j. angielskim:

- *computer aided design* – zajęcia wykładowe i projektowe,
- *advanced CAx Systems* – zajęcia wykładowe i projektowe – koordynator przedmiotu
- *final project* – zajęcia projektowe / konsultacyjne.

Inne formy popularyzacji nauki:

- uczestnictwo w jury konkursu *Wschodzący Innowatorzy* 2023r i 2024r (organizowanego w ramach projektu „Politechniczna Sieć Via Carpatia im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego”,
- uczestnictwo w jury konkursu *Niesamowita maszyna* w latach 2023 i 2024, organizowanego przez Politechnikę Białostocką,
- uczestnictwo w jury konkursu SkillsPoland Edycja Specjalna 2022r – w konkurencji inżynieria mechaniczna CAD,
- prowadzenie zajęć w ramach Białostockiego Uniwersytetu Dziecięcego organizowanego przez Politechnikę Białostocką,
- prowadzenie pokazów eksperymentów naukowych w trakcie *Dni otwartych Politechniki Białostockiej*
- prowadzenie pokazów eksperymentów naukowych w trakcie *Dni Wydziału Mechanicznego*,
- prezentacja Laboratoriów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej,
- promowanie Politechniki Białostockiej w szkołach ponadpodstawowych w ramach Targów Edukacyjnych.

Odznaczenia i nagrody:

- Medal Komisji Edukacji Narodowej za szczególne zasługi dla oświaty i wychowania (17.08.2021).
- Nagrody rektora PB za działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną w latach akademickich: 2014/2015, 2015/2016, 2016/2017, 2019/2020, 2020/2021, 2021/2022, 2022/2023.

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze.

Uczestnictwo w projektach finansowanych w ramach konkursów ogłoszonych przez Narodowe Centrum Nauki, wraz z podaniem roli pełnionej przez wnioskodawcę:

- Kierownik projektu naukowo-badawczego – „Badanie dynamiki zalewania dyszy cieczą podczas formowania się kolumny pęcherzy” – - otrzymanego w ramach konkursu PRELUDIUM 7 organizowanego przez NCN; nr umowy UMO- 2014/13/N/ST8/03312, okres realizacji: 28.01.2015 - 27.01.2018, nakłady: 107810.- zł.

Moja rola w projekcie polegała na opracowaniu stanowisk badawczych do badania dynamiki zalewania dyszy cieczą podczas formowania się kolumny pęcherzy. Nadzór i wykonywanie badań związanych z tym zagadnieniem. Analiza i opracowanie wniosków płynących z otrzymanych wyników badań. Publikacja wyników badań oraz zarządzanie projektem.

- Wykonawca w projekcie naukowo-badawczym – „Dynamika oddziaływania pęcherzy gazowych w procesie niestacjonarnego formowania się u wylotu dysz zanurzonych w cieczy newtonowskiej” - otrzymanego w ramach konkursu PRELUDIUM 2 organizowanego przez NCN; nr umowy UMO- 2011/03/N/ST8/04079, okres realizacji: 22.08.2012 - 21.08.2015, nakłady 113 100.- zł.

Moja rola w projekcie polegała na wykonaniu stanowisk badawczych oraz wsparcie w przeprowadzeniu serii badań dotyczących oddziaływania pomiędzy pęcherzami gazowymi odrywającymi się w cieczach. Pomoc w zestawieniu i analizie wyników badań. Opracowanie wniosków płynących z otrzymanych wyników badań i ich publikacja.

- Wykonawca w projekcie naukowo-badawczym – „Stabilność intensyfikowanego przez mikromembranę wrzenia w minikanale” - otrzymanego w ramach konkursu OPUS 14 organizowanego przez NCN; nr umowy UMO- 2017/27/B/ST8/02905, okres realizacji: 2018-07-17- 2021-07-16, nakłady 392 984.- zł.

Moja rola w projekcie polegała na pracach pomocniczych przy wykonywaniu stanowisk badawczych oraz udziale w prowadzeniu badań dotyczących stabilność wrzenia w minikanale, intensyfikowanego przez mikromembranę. Współuczestniczyłem w analizie i publikacji otrzymanych wyników badań.

Uczestnictwo w projektach finansowanych w ramach konkursów ogłoszonych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju i/lub PARP, wraz z podaniem roli pełnionej przez wnioskodawcę:

- Wykonawca w projekcie B+R z firmą Moose.inc - POIR.01.01.01-00-1056/17 System SmartBRAKE - Inteligentny System Asekuracji Ruchu i Trasy Roweru. 3501638 PLN.
W ramach projektu odpowiedzialny byłem za wykonanie konstrukcji mechanicznej stanowiska do badania siły hamowania hamulca rowerowego. Ponadto byłem głównym konstruktorem podzespołów mechanicznych inteligentnego hamulca rowerowego.

- Wykonawca w projekcie „Bon na innowację” – POIR.02.03.02-20-0051/20 - My Wash – Usługa badawcza polegająca na opracowaniu innowacyjnej lancy używanej na myjniach samochodowych.

W ramach projektu odpowiedzialny byłem za konstrukcję mechaniczną lancy z jednoczesnym jej badaniem i testami w warunkach laboratoryjnych oraz warunkach zbliżonych do warunków rzeczywistych.

- Wykonawca w projekcie „Bon na innowację” - POIR.02.03.02-02-0133/20 - Opracowanie innowacyjnego rozdrabniacza do zastosowań w domowej eko-gospodarce odpadów.

W ramach projektu odpowiedzialny byłem za konstrukcję mechaniczną rozdrabniacza z jednoczesnym jego badaniem i testami w warunkach laboratoryjnych oraz warunkach zbliżonych do warunków rzeczywistych.

Dorobek naukowy (bez uwzględnienia pozycji ujętej do dzieła):

1. Dzienis Paweł, Łukaszewicz Andrzej: Przygotowanie danych CAD w procesie inżynierii odwrotnej w rzeźbiarstwie. Postępy Nauki i Techniki (2011), 133-140.
Mój wkład w powstanie pracy: opracowanie metodyki przygotowywania danych CAD do procesu wytworzenia rzeźby, przygotowanie wyników badań do publikacji, napisanie oraz opracowanie graficzne pracy.
2. Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald, Wyszowski Tomasz: The dynamics of liquid movement inside the nozzle during the bubble departures for low air volume flow rate. Acta Mechanica et Automatica 6 (2012), 31-36.
Mój wkład w powstanie pracy: budowa stanowiska pomiarowego, wykonanie serii badań, opracowanie wyników badań, przygotowanie wniosków płynących z wyników badań, napisanie oraz opracowanie graficzne pracy.
3. Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald: Synchronization of data recorded using acquisition stations with data from camera during the bubble departure. Advances in Science and Technology, Research Journal 7(20) (2013), 29-34.
Mój wkład w powstanie pracy: opracowanie metody pozwalającej na synchronizację danych rejestrowanych za pomocą kamery i stacji akwizycji danych, napisanie oraz opracowanie graficzne pracy.
4. Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald: Stability of periodic bubble departures at a low frequency. Chemical Engineering Science 109 (2014), 171-182.
Mój wkład w powstanie pracy: budowa stanowiska pomiarowego, wykonanie serii badań, opracowanie wyników badań, przygotowanie wniosków płynących z wyników badań, napisanie oraz opracowanie graficzne pracy.
5. Mosdorf Romuald, Dzienis Paweł, Litak Grzegorz: The loss of synchronization between air pressure fluctuations and liquid flow inside the nozzle during the chaotic bubble departures, Meccanica 52 (2017), 2641- 2654.
Mój wkład w powstanie pracy: budowa stanowiska pomiarowego, wykonanie serii badań, opracowanie wyników badań, prace pomocnicze w przygotowaniu wniosków płynących z wyników badań, współudział w pisaniu pracy.

6. Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald, Wyszowski Tomasz, Rafałko Gabriela: Non-linear analysis of air pressure fluctuations during bubble departure synchronization, *Acta Mechanica et Automatica*, 13(3) (2019), 158- 165.

Mój wkład w powstanie pracy: współudział w budowie stanowiska pomiarowego, współudział w wykonaniu serii badań, opracowanie wyników badań, przygotowanie wniosków płynących z wyników badań, napisanie oraz opracowanie graficzne pracy.

7. Gabriela Rafałko, Hubert Grzybowski, Paweł Dzienis, Romuald Paweł Mosdorf, Adam Adamowicz: Image analysis of flow maldistribution during boiling in parallel minichannels. *Chemical Engineering and Technology* 44 (11) (2021), 1978-1985.

Mój wkład w powstanie pracy: współudział w budowie stanowiska pomiarowego, współudział w wykonaniu serii badań, współudział w opracowaniu wyników badań.

8. Gabriela Rafałko, Hubert Grzybowski, Paweł Dzienis, Iwona Zaborowska, Romuald Mosdorf, Grzegorz Litak: Recurrence analysis of phase distribution changes during boiling flow in parallel minichannels. *European Physical Journal of Special Topics* 232 (2023), 201-207.

Mój wkład w powstanie pracy: współudział w budowie stanowiska pomiarowego, współudział w wykonaniu serii badań, współudział w opracowaniu wyników badań.

9. Gargasas Justinas, Baziene Kristina, Dzienis Paweł: Low energy buildings: multifunctional strategies and solutions. *Entrepreneurship and Sustainability Issues* 11(2) (2023), 314-330.

Mój wkład w powstanie pracy: opracowanie metodyki badań/ zagadnień, recenzję oraz opracowanie graficzne pracy.

10. Kosciuczuk, U., Dardzinska, A., Kasperczuk, A., Dzienis, P., Tomaszuk, A., Tarnowska, K., Rynkiewicz-Szczepanska, E., Kossakowska, A., Pryzmont, M.: Practice Guidelines for Monitoring Neuromuscular Blockade—Elements to Change to Increase the Quality of Anesthesiological Procedures and How to Improve the Acceleromyographic Method. *Journal of Clinical Medicine* 13 (2024), 1976. <https://doi.org/10.3390/jcm13071976>.

Mój wkład w powstanie pracy: wykonanie przeglądu rozwiązań technicznych urządzeń mechanicznych stosowanych przy badaniu zwiótczenia mięśni oraz opracowanie wniosków płynących z tego przeglądu.

11. Koszewnik Andrzej, Ambroziak Leszek, Ołdziej Daniel, Dzienis Paweł, Ambrożkiewicz Bartłomiej, Syta Arkadiusz, Bouattour Ghada, Kanoun Olfa: Nonlinear recurrence analysis of piezo sensor placement for unmanned aerial vehicle motor failure diagnosis, *Scientific Reports* 14, (2024) 8289.

Mój wkład w powstanie pracy: dobór nieliniowych metod analizy danych do badania uszkodzeń silników na podstawie danych rejestrowanych przez czujniki piezoelektryczne, wykonanie badania szeregów czasowych z wykorzystaniem metod nieliniowej analizy danych, współudział w pisaniu pracy.

12. Mosdorf Romuald, Rafałko Gabriela, Zaborowska Iwona, Dzienis Paweł, Grzybowski Hubert, Complexity of two-phase flow dynamics using the recurrence and high speed video analysis, *Archives of Thermodynamics*, 45 (2), (2024) 73-81.

Mój wkład w powstanie pracy: współudział w budowie stanowiska pomiarowego, współudział w wykonaniu serii badań, współudział w opracowaniu wyników badań.

13. Rafałko Gabriela, Mosdorf Romuald, Grzybowski Hubert, Dzienis Paweł, Górski Grzegorz, Multiscale entropy applications for complexity analysis of two-phase flow, Archives of Thermodynamics, 45 (2), (2024) 83-90.

Mój wkład w powstanie pracy: współudział w budowie stanowiska pomiarowego, współudział w wykonaniu serii badań, współudział w opracowaniu wyników badań.

14. Ambrożkiewicz Bartłomiej, Dzienis Paweł, Ambroziak Leszek, Koszewnik Andrzej, Syta Arkadiusz, Ołdziej Daniel, Pakrashi Vikram: Diagnostics of Unmanned Aerial Vehicle with recurrence based approach of piezo-element voltage signals, Scientific Reports 14, (2024) 17211.

Mój wkład w powstanie pracy: opracowanie metodologii badań, weryfikacja wyników nieliniowych metod analizy danych do badania uszkodzeń silników na podstawie danych rejestrowanych przez czujniki piezoelektryczne, współudział w pisaniu pracy.

Publikacje w materiałach pokonferencyjnych indexowane w bazie WoS:

1. Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald, Augustyniak Jakub. Liquid penetration inside glass nozzle during bubble departures in water. Journal of Physics: Conference Series 745 (2016), 032048.

Mój wkład w powstanie pracy: budowa stanowiska pomiarowego, wykonanie serii badań, opracowanie wyników badań, przygotowanie wniosków płynących z wyników badań, napisanie oraz opracowanie graficzne pracy.

2. Dzienis Paweł, Mosdorf Romuald, Tomaszuk Daniel, Suchecki Witold: Formation of bubble chains over twin nozzles, MATEC Web of Conferences 240 (2018), 1-5, DOI:10.1051/mateconf/201824005039 5.

Mój wkład w powstanie pracy: budowa stanowiska pomiarowego, wykonanie serii badań, opracowanie wyników badań, przygotowanie wniosków płynących z wyników badań, napisanie oraz opracowanie graficzne pracy.

Współautor złożonych wniosków patentowych:

- P.436582 - System mechatroniczny umożliwiający zdalne hamowanie kołem roweru - Golak Karol, Dzienis Paweł, Bajkowski Adam, Ołdziej Daniel, Bartoszewicz Błażej, Grądzki Rafał, Półtorak Wojciech, Słowik Maciej, Gulewicz Małgorzata, data zgłoszenia: 31-12-2020 wniosek rozpatrzono pozytywnie, została przyznana ochrona patentowa.

Mój wkład w powstanie rozwiązania konstrukcyjnego: opracowanie konstrukcji mechanicznej rozwiązania konstrukcyjnego opisanego we wniosku.

- P.441609 - Urządzenie do generowania mikro lub nanopęcherzy gazowych w cieczach - Dzienis Paweł, Ołdziej Daniel, Koszewnik Andrzej, Mosdorf Romuald Paweł, data zgłoszenia: 30-06-2022.

Mój wkład w powstanie rozwiązania konstrukcyjnego: pomysłodawca rozwiązania oraz wykonanie serii badań dotyczących oddziaływania pomiędzy pęcherzami i wpływu warunków hydrodynamicznych na proces formowania się pęcherzy

gazowych (badania były niezbędne do powstania rozwiązania urządzenia do generowania pęcherzy gazowych w mikro i nano skali). Oszacowany udział wskazany do wniosku patentowego – 40%.

- P.445028 – Urządzenie sortujące - Ryba Agnieszka, Hovsepyan Ruben, Dębiński Mateusz, Ołdziej Daniel, Dzienis Paweł, data zgłoszenia: 29-05-2023.

Mój wkład w powstanie rozwiązania konstrukcyjnego: opracowanie konstrukcji mechanicznej rozwiązania konstrukcyjnego opisanego we wniosku.