

Michał E. Klugmann
Katedra Energetyki i Aparatury Przemysłowej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Gdańska
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

AUTOREFERAT

Przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.)

Gdańsk 2020 r.

Spis Treści:

1. Imię i nazwisko	2
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe oraz tytuł rozprawy doktorskiej	2
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu	2
4. Omówienie osiągnięcia naukowego, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy	2
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	2
4.2. Opis osiągnięcia naukowego	3
4.2.1. Motywacja do podjęcia badań	3
4.2.2. Stan wiedzy w momencie podjęcia badań	4
4.2.3. Opis przeprowadzonych badań i wnioski z badań	6
4.2.3.1. Badania obiegu termosyfonowego	6
4.2.3.2. Badania wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie	8
4.2.3.3. Badania nierównomierności rozprzysychnienia czynnika w minigeometriach	11
4.2.4. Podsumowanie osiągnięcia naukowego	12
4.3. Wpływ osiągnięcia naukowego na dyscyplinę naukową	13
4.4. Wykaz prac opublikowanych w ramach osiągnięcia naukowego	14
4.4.1. Publikacje recenzowane z listy Journal Citation Reports (JCR), wg Web of Science	14
4.4.2. Publikacje recenzowane spoza listy Journal Citation Reports (JCR)	14
4.4.3. Aktywności konferencyjne (w tym publikacje w materiałach konferencyjnych)	15
5. Omówienie wybranych osiągnięć nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego, ale istotnie wzbogacających dorobek wnioskodawcy w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych	15
5.1. Badania wymiany ciepła, spadku ciśnienia i intensyfikacji wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie przez minikanaly	15
5.2. Badania z zakresu materiałoznawstwa	17
5.3. Wykaz publikacji z listy Journal Citation Reports (JCR) z dziedziny nauk inżynierijno-technicznych nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego	17
5.4. Wybrane aktywności konferencyjne (w tym publikacje w materiałach konferencyjnych) z dziedziny nauk inżynierijno-technicznych nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego	18
5.5. Udział w projektach badawczych finansowanych ze źródeł zewnętrznych	19
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę	19
6.1. Przedmioty prowadzone w ramach podstawowego programu studiów	19
6.2. Przedmioty autorskie	19
6.2.1. Wykład „Losy Cywilizacji”, dawniej „Historia i Zabytki Techniki”	19
6.2.2. Wykład „Termografia w IM-M” wraz z laboratorium	20
6.3. Osiągnięcia organizacyjne i działania popularyzujące naukę	20
7. Inne informacje, ważne z punktu widzenia kariery zawodowej	21
7.1. Wykaz publikacji z dziedziny historii techniki	23
8. Podsumowanie	24

1. Imię i nazwisko

Michał Eugeniusz Klugmann

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe oraz tytuł rozprawy doktorskiej

2010 **stopień doktora nauk technicznych** w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn (specjalność: Termodynamika i Wymiana Ciepła), Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny. Tytuł rozprawy doktorskiej: *Intensyfikacja wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w kanałach o małej średnicy.*

promotor: prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielwicz

recenzenci: prof. dr hab. inż. Jan Stąsiek (Politechnika Gdańska)

 prof. nadzw. dr hab. inż. Marian Czapp (Politechnika Koszalińska)

2004 **tytuł magistra inżyniera** - Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Techniki Ciepłej (obecnie Katedra Energetyki i Aparatury Przemysłowej). Tytuł pracy magisterskiej: *Badania wymiany ciepła i masy w adsorpcyjnych urządzeniach klimatyzacyjnych.*

promotor: dr inż. Marek Jaskólski

recenzent: prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielwicz

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu

2004 – 2010 **doktorant/asystent** w Katedrze Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska

2010 – 2018 **adiunkt** w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska

2018 – 2019 **starszy wykładowca** w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska

2019 – nadal **adiunkt dydaktyczny** w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska

4. Omówienie osiągnięcia naukowego, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

„Badania miniszczelinowych i minikanałowych wymienników ciepła do zastosowań solarnych”

4.2. Opis osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem naukowym, proponowanym jako podstawa do nadania stopnia naukowego doktora habilitowanego, jest przeprowadzenie kompleksowych, wielowątkowych badań nad zjawiskami cieplnymi i przepływowymi w modelowych miniszczelinowych i minikanalowych wymiennikach ciepła. Rezultaty tych badań składają się na cykl 7 publikacji w recenzowanych i punktowanych czasopismach. Badania te wpisują się w szerszą tematykę od wielu lat realizowaną w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Częściowo zostały one zrealizowane dzięki finansowaniu z grantu Narodowego Centrum Nauki nr 2015/19/D/ST8/03201 w latach 2016 – 2020, którego byłem kierownikiem.

4.2.1. Motywacja do podjęcia badań

Systemowe odchodzenie od tradycyjnych źródeł energii, opartych o zasoby nieodnawialne i scentralizowanych, w kierunku OZE i kogeneracji rozproszonej stawia wiele nowych zadań przed badaczami i konstruktorami. Przede wszystkim, jeśli stosowanie takich rozwiązań w gospodarstwach domowych ma być powszechne, muszą one być tanie i niezawodne (w miarę możliwości – bezobsługowe). Niską cenę z niezawodnością połączyć można tylko poprzez prostotę konstrukcji, minimalizację części ruchomych i wykorzystanie prostych zjawisk fizycznych. Jest to niejako powrót do dobrych tradycji z czasów, gdy powstawała nowoczesna technika. Dla przykładu, przy budowie nowoczesnych wodociągów, od połowy XIX wieku do II Wojny Światowej, starano się wykorzystywać naturalne różnice wysokości terenu (tam, gdzie to było możliwe) w celu uzyskania grawitacyjnego transportu wody. Prosty (jednofazowy, z transportem ciepła od dołu do góry) obieg termosyfonowy był powszechnie stosowany do rozprowadzania ciepła w budynkach. Przy korzystnej konfiguracji, systemy wodociągowe i CO w ogóle nie wymagały zasilania elektrycznego ani wykorzystania pomp. Obecnie, w wielu dziedzinach techniki obserwuje się renesans podobnych rozwiązań.

O ile w systemach CO źródło ciepła (kotłownia) znajduje się z reguły poniżej poziomu odbiorników ciepła, tak w systemach solarnych mamy zwykle do czynienia z sytuacją odwrotną i umieszczeniem źródeł ciepła (kolektorów słonecznych) na dachu budynku. Opracowano wiele rozwiązań tzw. odwróconych termosyfonów, pozwalających na transport ciepła z góry do dołu. Jednym z interesujących przykładów jest odwrócony termosyfon z parowym podnośnikiem cieczy i z pojedynczym czynnikiem roboczym. Jest więc konstrukcyjnie stosunkowo prosty. Jego działanie polega na tym, że powstająca w parowniku para powoduje wypychanie porcji cieczy do separatora, umieszczonego w najwyższym punkcie instalacji. Stamtąd ciecz, oraz ulegająca skropleniu para, grawitacyjnie spływają do skraplacza, gdzie oddają ciepło.

Z opisanej zasady działania wynika, że kluczowe dla uzyskania pracy układu jest wytworzenie pary, zapewniającej transport czynnika. Taka obserwacja natchnęła mnie do połączenia dwóch wątków moich zainteresowań z obszaru techniki cieplnej: wymiany ciepła podczas wrzenia w minigeometriach oraz energetyki solarnej i podjęcia próby zaimplementowania minigeometrii do wytwarzania pary na potrzeby napędu obiegu termosyfonowego. Owa implementacja miała miejsce w parowniku, który stanowił płytowy mini-wymiennik ciepła. Mając do wyboru geometrię miniszczelinową i pakiety minikanalów, w pierwszej kolejności zamierzałem skupić się na miniszczelinie, ponieważ wymiana ciepła podczas wrzenia w miniszczelinach była, jak dotąd, znacznie rzadziej badana i opisywana w literaturze. Ponadto, geometria miniszczelinowa wydawała się z kilku względów bardziej korzystna (łatwość wykonania, mniejsza podatność na zanieczyszczenia czynnika, potencjalnie lepszy rozptył czynnika). Wykonanie jednej ścianki wymiennika jako przezroczystej

(czyli de-facto skonstruowanie mini- kolektora cieplnego) dało ponadto pole do łatwej obserwacji wizualnej zachodzących zjawisk. Dodatkowo, moje prywatne zainteresowania związane z fotografią i technikami rejestracji audiowizualnej, umożliwiły istotne wzbogacenie wątku jakościowego badań.

Aby uzyskać komplementarność z poprzednio prowadzonymi badaniami (por. pkt. xx), przebadłem również geometrię minikanalową (multiporty złożone z 50 równoległych minikanalów).

4.2.2. Stan wiedzy w momencie podjęcia badań

Jak wspominałem w poprzednim punkcie, większość opublikowanych prac dotyczyła mini- i mikrokanałów. Z nielicznych publikacji dedykowanych miniszczelinom, wymienić warto następujące:

Alam i inni (2013) prowadzili badania porównawcze wymiany ciepła i spadku ciśnienia wymiennikach miniszczelinowym i minikanalowym. Czynnikiem roboczym była woda o temperaturze wlotowej 85 °C i o zmiennym masowym natężeniu przepływu $400 \div 1000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ (gęstość strumienia ciepła $0 \div 85 \text{ W/cm}^2$). Przeprowadzono wizualizację przepływu za pomocą szybkiej kamery dla porównania charakterystyki pęcherzyków w obu kanałach. Wyniki badań wskazują, że wymiennik miniszczelinowy jest bardziej efektywny dla wysokich strumieni ciepła i niskich natężeń przepływu ze względu na dominację wirowej i pierścieniowej struktury przepływu i później występujący dryout. Dla wszystkich wartości gęstości strumienia ciepła, opory przepływu są większe w przypadku minikanalów. Ponadto geometria miniszczelinowa wydaje się być obiecująca ze względu na ograniczenie występowania lokalnych „hot spotów”, redukcję niestabilności przepływu i przepływu zwrotnego oraz zapewnienie bardziej równomiernego rozkładu temperatury ścianki na ogrzewanej powierzchni.

Alam i inni (2012) przebadali wpływ szerokości miniszczeliny (w zakresie $80 \div 1000 \text{ }\mu\text{m}$) na efektywność wymiany ciepła i spadek ciśnienia, dla wody. Wyniki badań pokazują, że ograniczenie przepływu wrzącego występuje dla miniszczelin o szerokości $>500 \text{ }\mu\text{m}$ i wówczas dominują struktury wirowa i pierścieniowa. Fizycznie ograniczenie nie występuje dla o szerokości $<700 \text{ }\mu\text{m}$ i dominuje wówczas przepływ pęcherzykowy. Poniżej $100 \text{ }\mu\text{m}$ miniszczelina jest nieefektywna ze względu na bardzo wcześnie występujące częściowe wysychanie filmu cieczowego na ścianie, czyli tzw. dryout. Spadek ciśnienia i fluktuacje ciśnienia zmniejszają się wraz ze zwiększaniem szerokości miniszczeliny, natomiast temperatura i jej fluktuacje rosną wraz z szerokością. Silną zależność pomiędzy współczynnikiem przejmowania ciepła a szerokością miniszczeliny zaobserwowano dla szerokości $500 \text{ }\mu\text{m}$ i mniejszych.

Doniesień z dedykowanych badań poświęconych intensyfikacji wymiany ciepła w miniszczelinach praktycznie nie spotykało się. Można było znaleźć prace opisujące specyficzne przypadki minikanalów, z których wnioski dało się w pewnym stopniu odnieść do miniszczelin. Są to, między innymi, pakiety kanałów równoległych lub kanały o przekroju prostokątnym, o znacząco różnych długościach boków przekroju.

Piasecka i inni (2004–2014), w licznych pracach z wykorzystaniem folii grzejnej w minikanale, ogrzewanym asymetrycznie wykazywali, że zastosowanie powierzchni rozwiniętej powoduje, iż wrzenie rozpoczyna się przy około 30% niższych gęstościach strumienia ciepła w stosunku do powierzchni gładkiej. Dalszą konsekwencją jest zmniejszenie przegrzania powierzchni. Wpływ rozwinięcia powierzchni na wzrost współczynnika przejmowania ciepła wynosi od kilku do kilkudziesięciu procent, w zależności od zastosowanej powierzchni i warunków cieplno – przepływowych.

Piasecka (2014) w swojej monografii dokonała szerokiego porównania własnych wyników z wybranymi z literatury, zastosowała też korelacje innych badaczy, opisujące wymianę ciepła podczas wrzenia do opisu własnych danych. Autorka wykazała, że zależnościami, które można stosować dla kanału pionowego (położenie 90°) i poziomego (położenie 0°) z uznawaną granicą błędów ($\pm 35\%$) są korelacje Shaha, Kandlikara i Steinke, Mikieliewicza i innych oraz Dutkowskiego. Dla kanału poziomego dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi (26%) uzyskano przy zastosowaniu korelacji Coopera, zasadniczo przeznaczonej dla wrzenia w dużej objętości. Należy podkreślić, że dane eksperymentalne dotyczyły kanałów o rozwiniętej powierzchni, podczas gdy dostępne korelacje dotyczą powierzchni gładkiej. Uniwersalne równanie korelacyjne należałoby wzbogacić o parametry rozwinięcia powierzchni oraz położenia kanału.

Bai i inni (2013) przedstawili wyniki badań wrzenia podczas przepływu etanolu przez trzy równoległe mikrokanaly o średnicy $540\ \mu\text{m}$, z pokryciem porowatym otrzymanym za pomocą spiekania. Zaobserwowano intensyfikację wymiany ciepła w kanale z pokryciem porowatym, zależną od wielkości porów. Efekt intensyfikacji zmniejszał się wraz ze wzrostem stopnia suchości.

Morshed i inni (2012) badali przepływ przez kanał o wymiarach $0.36\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 26\ \text{mm}$ i średnicy hydraulicznej $672\ \mu\text{m}$, pokryty miedzianym „nanoszkieletem”. Kanał ogrzewano asymetrycznie (dolną powierzchnię). Stwierdzono intensyfikację wymiany ciepła: do 25% w obszarze konwekcji jednofazowej, do 56% dla obszaru wrzenia i zwiększenie spadku ciśnienia do 20% w obu obszarach.

Sun i inni (2011) badali wpływ mikropokryć porowatych (napiekanych) na intensyfikację wymiany ciepła w kanałach prostokątnych o średnicach hydraulicznych $0.49\ \text{mm}$, $0.93\ \text{mm}$ i $1.26\ \text{mm}$, których dolną ściankę stanowiła powierzchnia rozwinięta. Stwierdzono istotne zwiększenie współczynników przejmowania ciepła w stosunku do powierzchni gładkiej. Analizowano wpływ rozmiarów kanału, zauważając, że ich zmniejszanie prowadzi do zmniejszenia wartości krytycznego strumienia ciepła. W innych badaniach, przeprowadzonych dla poziomych kanałów prostokątnych o średnicy hydraulicznej $2.27\ \text{mm}$ i dla wody, Sun i inni (2011) stwierdzili, że zastosowanie pokryć napiekanych powoduje 2.7-krotny wzrost współczynnika przejmowania ciepła w obszarze wrzenia przechłodzonego i 3-krotny w obszarze wrzenia nasyconego.

Wang i Peterson (2010) wykorzystali drobne metalowe siatki porowate, stanowiące jedną ze ścian czterech równoległych mikrokanalów o głębokości $510\ \mu\text{m}$ i długości $57,1\ \text{mm}$, oraz czynnik HFE7000. Zaobserwowano niższe przegrzanie powierzchni grzejnej dla przypadku intensyfikacji, w por. z kanałami gładkimi, przy znacząco niższej temperaturze powierzchni grzejnej. Autorzy sugerowali, że zastosowanie siatki porowatej wpływa na powiększenie pęcherzyków parowych i wzrost ich liczby. Nie odnotowano zmiany wartości spadku ciśnienia podczas przepływu.

Z powyższego wynika, że badania nad miniszczelinami ciągle stanowią niewystarczająco opisaną niszę, a podjęcie kompleksowego programu w zakresie badań podstawowych było bardzo pożądane. Istotnym założeniem moich prac było połączenie zagadnień i zjawisk analizowanych dotychczas osobno, w jednym programie badawczym i poszukiwanie wzajemnych relacji i powiązań pomiędzy nimi. Dotyczyło to wpływu rozmiarów i struktury powierzchni miniszczeliny na wymianę ciepła i spadek ciśnienia, a także wpływu zjawisk związanych z wrzeniem w przepływie na pracę obiegów termosyfonowych. Ważną wartością dodaną miała być zaawansowana wizualizacja, pozwalająca na pogłębioną analizę jakościową.

Dobriansky (2011) stworzył dobrą bazę do opisu obiegów termosyfonowych. W swojej pracy dokonał przeglądu teoretycznej i technicznej wiedzy na temat szerokiego spektrum samoczynnych obiegów, takich jak termosyfony czy rurki ciepła. Dotyczyło to zarówno obiegów transportujących ciepło z dołu

do góry, jak również obiegów odwróconych, transportujących ciepło z wyższego poziomu na niższy. Artykuł klasyfikuje zjawiska związane z transportem ciepła i masy w tych obiegach i analizuje nomenklaturę stosowaną w literaturze. Zaprezentowana została zasada działania 16 rozwiązań konstrukcyjnych obiegów odwróconych. 4 spośród nich napędzane są przez zewnętrzne źródło energii, pozostałe działają samoczynnie. W tej drugiej grupie 7 obiegów wykorzystuje parę do transportu ciepła, w pozostałych służy do tego ciecz. Zaprezentowane zostały zalety i wady obu typów obiegów w oparciu o dostępne wyniki badań.

4.2.3. Opis przeprowadzonych badań i wnioski z badań

Zakres przeprowadzonych przeze mnie prac, związanych z osiągnięciem habilitacyjnym, podzielić można na 3 wzajemnie uzupełniające się wątki:

- badania obiegu termosyfonowego,
- badania wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie,
- badania nierównomierności rozptywu czynnika w minigeometriach.

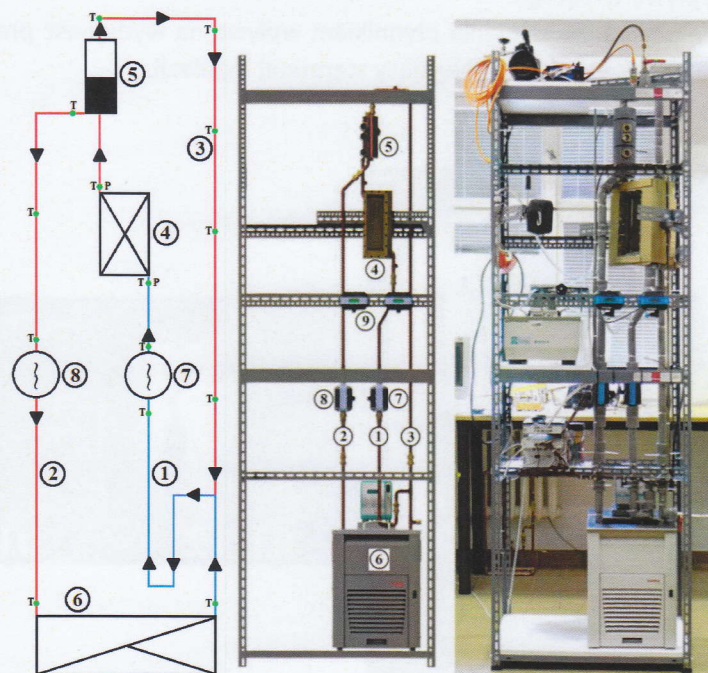
Przedmiotem badań były miniszczeliny i pakiety minikanatów, stanowiące struktury pojedynczej, modelowej płyty wymiennika ciepła. Zostały uformowane na powierzchni 0.1 x 0.2 m i ta powierzchnia była stała dla całego programu badań. Zmieniała się grubość miniszczelin w zakresie od 0.5 do 3 mm, a głębokość minikanatów w zakresie 0.5 do 1 mm. Ilość minikanatów w pakiecie była natomiast stała, co przekładało się na ich stałą szerokość 1 mm. Struktury te zostały umieszczone w module sekcji testowej, który był wymienny pomiędzy stanowiskami pomiarowymi, zbudowanymi na potrzeby trzech wątków badań. Ponadto, moduł zawierał „stronę wodną” służącą do doprowadzania ciepła za pomocą obiegu wodnego oraz przezroczystą pokrywę na potrzeby rejestracji wizualnej zjawisk. Założenia obiegu testowego dla wrzenia w przepływie i założenia samego programu badań były podobne do tych z mojej pracy doktorskiej i innych prac realizowanych w Katedrze (dla pojedynczych minikanatów), dla uzyskania porównywalności wyników. Zadbam też o porównywalność samych miniszczelin z pakietami minikanatów, dążąc do zapewnienia takiego samego przekroju czynnego odpowiadających sobie geometrii (miniszczelina vs minikanaty). Doprowadzanie czynnika roboczego do strefy roboczej odbywało się za pomocą kolektorów trapezowych (tzw. układ „Z”). Badania prowadzone były dla etanolu i dla wody destylowanej (przy ciśnieniu poniżej atmosferycznego – aby operować w zakresie parametrów interesujących z punktu widzenia techniki solarnej). Dużą uwagę poświęciłem rejestracji wizualnej zjawisk, w ścisłym powiązaniu z rejestracją danych pomiarowych. Współczynniki przejmowania ciepła wyznaczone były lokalnie na podstawie lokalnych pomiarów temperatury.

4.2.3.1. Badania obiegu termosyfonowego [2][3]

W odróżnieniu od termosyfonów prostych, transportujących ciepło z dolnego do górnego źródła, termosyfony działające w przeciwnym kierunku są zawsze bardziej złożone konstrukcyjnie. Tym nie mniej, w ramach tej grupy powstało wiele rozwiązań, różniących się stopniem skomplikowania budowy i eksploatacji. Jako obieg modelowy na potrzeby badań wybrałem termosyfon odwrócony z parowym podnośnikiem cieczy, pracujący z jednym czynnikiem roboczym. Jest to układ konstrukcyjnie i eksploatacyjnie przejrzysty. W toku budowy i badań wstępnych prototypów stanowiska pomiarowego i docelowego stanowiska, okazał się ponadto wysoce tolerancyjny na kwestie wymiarów i proporcji komponentów.

Dla obiegu termosyfonowego przebadalem:

- wpływ masowego natężenia przepływu na przejmowanie ciepła i spadek ciśnienia w parowniku,
- wpływ grubości miniszczeliny na przejmowanie ciepła i spadek ciśnienia w parowniku,
- wpływ temperatury ścianki i gęstości strumienia ciepła doprowadzonego do ścianki parownika na pracę termosyfonu,
- wpływ różnicy temperatur pomiędzy parownikiem i skraplaczem na pracę termosyfonu,
- wpływ ciśnienia w obiegu (czyli temperatury wrzenia czynnika) na pracę termosyfonu,
- wpływ wysokości napełnienia (czyli ilości czynnika w obiegu) na pracę termosyfonu,
- pulsacyjny charakter przepływu, jego rozkład w czasie, rozkład ciśnień w czasie,
- struktury przepływu dwufazowego.



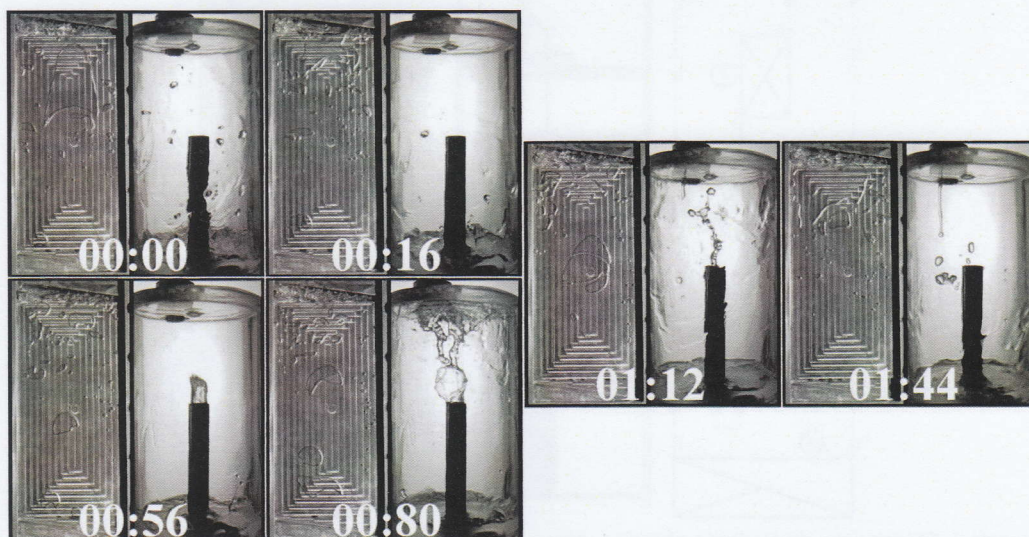
Ilustracja 1. Stanowisko do badania obiegu termosyfonowego; 1 – doprowadzenie zimnego czynnika do parownika, 2 – spływ cieczy do skraplacza, 3 – spływ pary do skraplacza, 4 – parownik, 5 – separator, 6 – skraplacz chłodzony w termostacie, 7 i 8 – pomiar masowego natężenia przepływu

Przeprowadziłem wizualizacje zarodkowania pęcherzyków, rozwoju wrzenia i kryzysu wrzenia oraz mechanizmu parowego podnoszenia cieczy (w tym materiały filmowe, porównujące sytuację dla różnych parametrów, wartościowe z punktu widzenia dalszych koncepcji wykorzystania stanowiska w dydaktyce).

Badania obiegu termosyfonowego doprowadziły do następujących konkluzji:

1. Zmniejszenie grubości miniszczeliny prowadzi do intensyfikacji procesu wrzenia w parowniku, ale nie oznacza to równoległego, liniowego wzrostu wydajności systemu. Intensywność wymiany ciepła w funkcji stopnia suchości wykazuje lokalne maksima.
2. W przeciwieństwie do układów pracujących pompowo, miniszczelina w prezentowanym układzie nie stanowi tradycyjnie rozumianego oporu przepływu, ponieważ sama generuje moc pompowania. Opór przepływu nie ogranicza więc wprost możliwości zmniejszenia grubości i średnicy hydraulicznej miniszczeliny.

3. Układ parownik-skrapłacz pokazuje pulsacyjny / cykliczny charakter pracy. Mimo to rozkłady temperatur w parowniku i skraplaczu pozostają stałe w czasie.
4. System wykazuje zdolność dynamicznej samoregulacji do ilości transportowanego ciepła, podczas gdy parametry brzegowe, tj. temperatura na wlocie i wylocie w parowniku i skraplaczu pozostają stałe.
5. Zwiększenie strumienia ciepła w parowniku zwiększa przepływ czynnika roboczego w instalacji. Wzrost ten staje się bardziej intensywny wraz ze spadkiem grubości miniszczeliny.
6. Wystąpienie dryoutu, czyli wysychania filmu cieczowego na ścianie kanału, powoduje natychmiastowe zatrzymanie obiegu i wypełnienie parownika zimną cieczą pochodzącą ze skraplacza, dzięki czemu system ma zdolność samo wygaszania.
7. Doprowadzenie powietrza z zewnętrznego źródła do kanału wlotowego parownika powoduje obieg czynnika. Jednak struktury mieszaniny powietrze-czynnik nie są takie same, jak struktury przepływu wrzącego.
8. Wykazałem, że poziom napełnienia czynnikiem wpływa na wydajność pracy obiegu, nie jest to jednak parametr krytyczny wymagający starannej regulacji.



Ilustracja 2. Wizualizacja parowego podnoszenia cieczy – zestawienie przebiegu procesu w parowniku i w separatorze

4.2.3.2. Badania wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie [1]

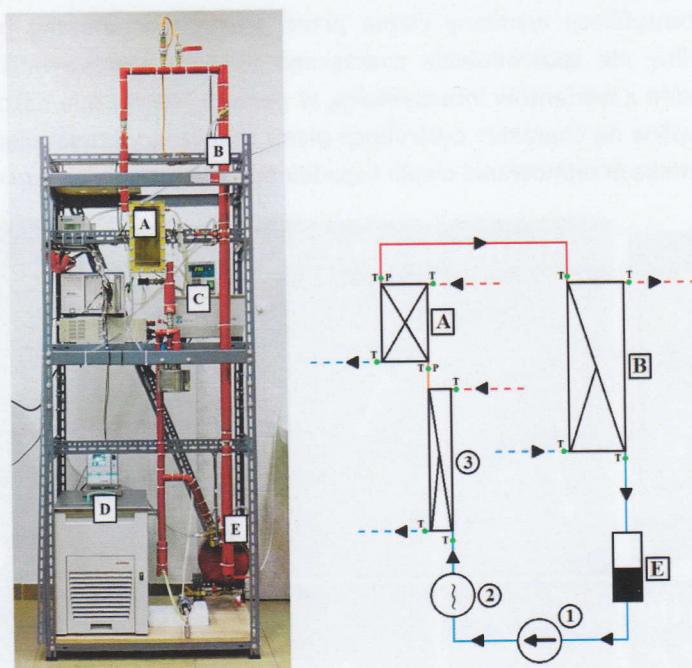
Specyfika pracy obiegu termosyfonowego, w szczególności jej pulsacyjny charakter w połączeniu z tendencją do samoregulacji, spowodowały, że efektywne przebadanie wszystkich aspektów pracy parownika, z zapewnieniem porównywalności z wcześniejszymi badaniami, okazało się niewykonalne na jednym stanowisku. Po pierwsze, trudno byłoby mówić o tradycyjnie rozumianym stanie ustalonym, po drugie – samoregulacja spowodowałaby, że dla parownika nie byłyby dostępne wszystkie wymagane zakresy parametrów pracy.

Dlatego postanowiłem rozszerzyć program badań budując drugie stanowisko pomiarowe dedykowane do badania wymiany ciepła podczas przemian fazowych (możliwe jest także badanie kondensacji w przepływie) w przepływie ustalonym, wymuszonym pompą. Powstałe stanowisko

zrealizowało przyjętą metodologię w zakresie tego typu badań, co pozwalało uzyskać porównywalne a nimi wyniki. Zapewniło też (w odróżnieniu od samoregułującego się układu termosyfonowego) pełną kontrolę wszystkich parametrów pracy.

W tej części przeprowadziłem:

- kompleksowe badania wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie dla takiej samej konstrukcji wymiennika w układzie pompowym, z uwzględnieniem wyznaczenia lokalnych współczynników przejmowania ciepła, analizy spadku ciśnienia i porównania wyników z korelacją pół empiryczną wrzenia w przepływie, rozwijaną od szeregu lat w Katedrze,
- analogiczne badania dla pakietów równoległych minikanatów przy założeniu takiego samego przekroju czynnego i porównanie z miniszczelinami,
- próby intensyfikacji wymiany ciepła (4 warianty), które nie przyniosły rezultatu w postaci zwiększenia współczynnika przejmowania ciepła, jednak uwidocznił się ich wpływ na nierównomierność rozptywu czynnika,
- badania poboczne nierównomierności rozdziału czynnika w strukturze przepływowej wymiennika (ang. flow maldistribution),
- próbne badania kondensacji w przepływie – pod kątem przyszłego rozszerzenia programu prac po zakończeniu realizacji projektu.



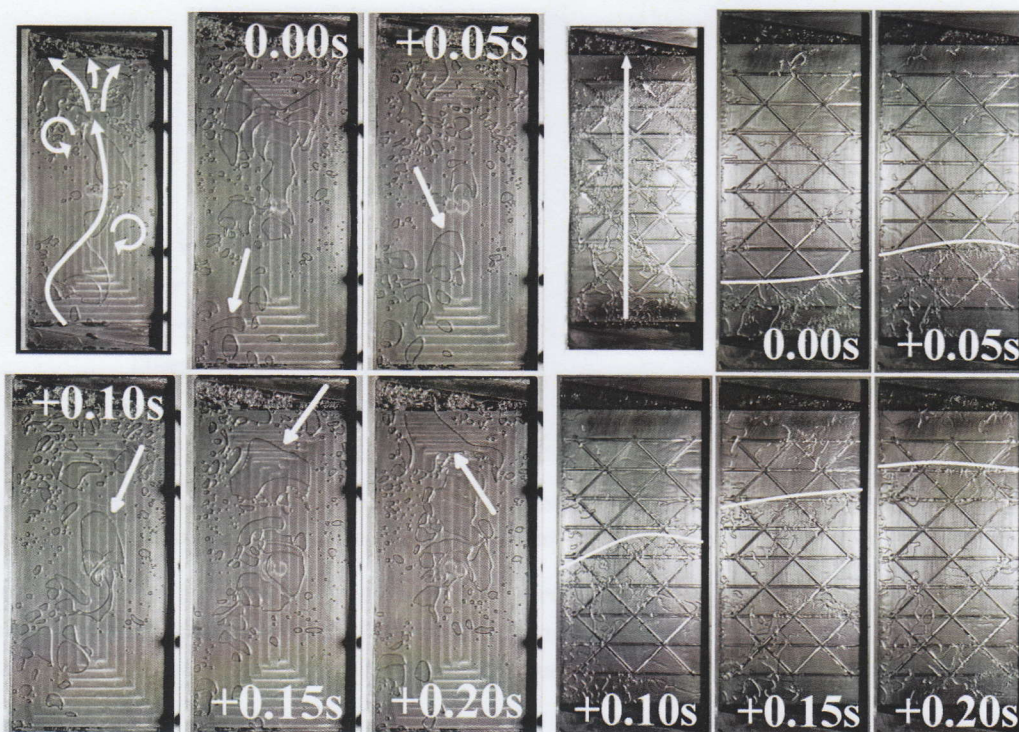
Ilustracja 3. Stanowisko do badania wrzenia i kondensacji w przepływie; A – parownik, B – skraplacz, C – termostat grzewczy, doprowadzanie ciepła, D – termostat chłodzący skraplacz, E – zbiornik ciepłego czynnika

Tak jak poprzednio, dla termosyfonu, zrealizowałem wizualizacje przepływu dwufazowego w układzie pompowym w powiązaniu z w. wym. pomiarami. Powstały kolejne wartościowe z punktu widzenia poznawczego i edukacyjnego materiały filmowe.

W ramach prac teoretycznych, udało mi się zidentyfikować struktury wrzenia i powiązać je z procesem wymiany ciepła, wyznaczyć stopnie suchości w zależności od parametrów pracy obiegu, oraz lokalne współczynniki przejmowania ciepła na powierzchni wymiany ciepła dla różnych parametrów przepływu i geometrii wymiennika.

Konkluzje z badań miniszczelin i pakietów minikanałów:

1. Zarówno w przypadku jednofazowej wymiany ciepła jak i wrzenia w przepływie, uzyskane wartości współczynnika przejmowania ciepła były zgodne, co do rzędu wielkości, z korelacjami literaturowymi. W przypadku wrzenia, największa rozbieżność dotyczy niskich stopni suchości. Może to być spowodowane efektami wlotowymi i nierównomiernością przepływu czynnika.
2. Zastosowany typ kolektorów oraz konfiguracja wlotu i wylotu skutkują nierównomiernym rozkładem zjawisk na powierzchni wymiany ciepła. Różnica między lewą i prawą stroną sekcji pomiarowej jest znacząca, podobnie jak zakłócenia w pobliżu wlotu i wylotu.
3. Wartość lokalnego współczynnika przejmowania ciepła rośnie wraz ze spadkiem grubości miniszczeliny. Jest on również wyższy w przypadku pakietu minikanałów niż w przypadku miniszczeliny o tym samym przekroju czynnym.
4. Spadek ciśnienia jest stosunkowo niewielki i zmienia się dość nieznacznie wraz z natężeniem przepływu. Przy dwukrotnym zmniejszeniu grubości miniszczeliny spadek ciśnienia zwiększa się o 25%. W przypadku pakietu minikanałów, w porównaniu do miniszczeliny, spadek ciśnienia nieznacznie wzrasta przy wyższych przepływach masowych.
5. Próba intensyfikacji wymiany ciepła przez prostą mechaniczną modyfikację powierzchni miniszczeliny nie spowodowała znaczącego wzrostu współczynnika przejmowania ciepła. Jednak jeden z wariantów intensyfikacji, w postaci poprzecznie i skośnie naciętych kanałów, wywarł wpływ na charakter dystrybucji płynu roboczego, powodując zmianę trendu krzywej współczynnika przejmowania ciepła i spadek oporów przepływu o około 25%.



Ilustracja 4. Charakter przepływu w miniszczelinie o grubości 1mm; z lewej – technicznie gładkiej (śledzenie ruchu pęcherza parowego); z prawej – z naciętymi na powierzchni kanałami (śledzenie czoła struktury parowej)

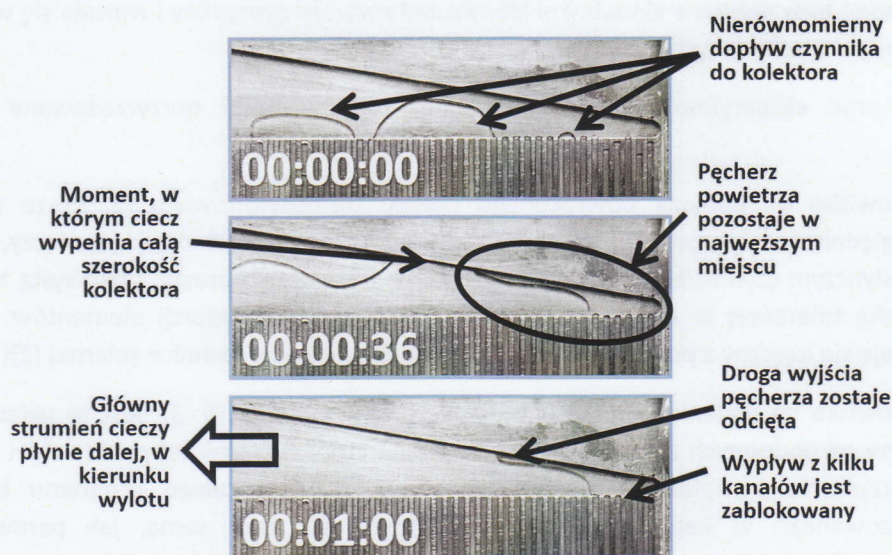
4.2.3.3. Badania nierównomierności rozptywu czynnika w minigeometriach [4][5]

Ten wątek badań wyniknął na podstawie analizy materiałów wizualnych, a także w toku interpretacji danych pomiarowych. Zaobserwowałem brak symetrii zjawisk między lewą a prawą stroną sekcji pomiarowej oraz silne zaburzenia w pobliżu wlotu i wylotu. Jako, że zagadnienia tzw. *flow maldistribution* są aktualnie przedmiotem szerszego zainteresowania badaczy, a ciągle są w niewystarczającym stopniu rozpoznane, postanowiłem poddać je pogłębionej analizie. Jako materiał posłużyły zarówno materiały wizualizacyjne (dla przepływu wrzącego oraz przepływu mieszaniny woda-powietrze), jak i dodatkowe badania, polegające na obserwacji rozptywu czynnika w momencie napełniania sekcji (dla przypadku przepływu adiabatycznego). Wyodrębniony wątek nierównomierności rozptywu czynnika w minigeometriach stał się tematem projektu PRELUDIUM, realizowanego przez doktoranta mgr inż. Pawła Dąbrowskiego i jest też tematem jego przyszłej rozprawy doktorskiej. Jestem wyznaczony na promotora pomocniczego w tej rozprawie.

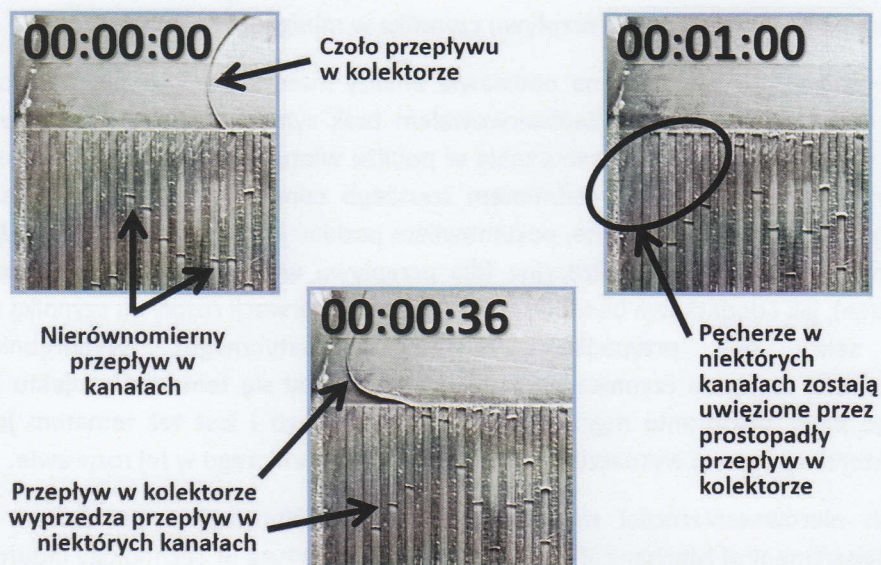
W badaniach nierównomierności rozptywu czynnika współpracuję z profesorem Rituneshem Kumarem z Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Indore, w Indiach.

W ramach prac związanych z nierównomiernością rozptywu czynnika uzyskałem następujące wyniki:

1. Kompleksowe badania eksperymentalne umożliwiły rozpoznanie mechanizmu nierównomierności rozptywu w pakiecie równoległych minikanalów i w miniszczelinie oraz jego zależność od głównych parametrów: natężenia przepływu i wymiaru charakterystycznego.
2. Wizualizacja przepływu pomogła zarejestrować dwa typy charakterystycznych i w pełni powtarzalnych mechanizmów blokowania kanałów.
3. Udało się powiązać zjawisko nierównomierności rozptywu czynnika z chwilowym rozkładem ciśnienia. Jego pomiar może być metodą diagnostyki wymiennika.



Ilustracja 5. Mechanizm blokowania kanałów nr 1



Ilustracja 6. Mechanizm blokowania kanałów nr 2

4.2.4. Podsumowanie osiągnięcia naukowego

Osiągnięcie habilitacyjne można zaklasyfikować jako wielowątkowy i kompleksowo zrealizowany cykl prac na temat zjawisk cieplnych i przepływowych w minigeometriach, nawiązujący do moich wcześniejszych dokonań naukowych (m.in. w ramach pracy doktorskiej i późniejszego wykonawstwa grantów badawczych) i korespondujący z całokształtem badań prowadzonych w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. Tematyka badań była zgodna z aktualnymi kierunkami rozwoju dyscypliny i wpisała się w kilka ciągle niewystarczająco przebadanych tematów.

W ramach prac eksperymentalnych zbudowałem dwa w pełni oprzyrządowane stanowiska pomiarowe:

- Stanowisko do badania odwróconego obiegu termosyfonowego (Il. 1) ze szczególnym uwzględnieniem parownika. Wybrałem układ z parowym podnośnikiem cieczy, pracujący z pojedynczym czynnikiem roboczym z uwagi na stosunkowo prostą, przejrzystą konstrukcję i wysoką tolerancję w zakresie wymiarów i wzajemnych proporcji elementów. Taki wybór wydaje się logiczny z punktu widzenia docelowej aplikacji w technice solarnej [2][3].
- Stanowisko do badania wrzenia i kondensacji w przepływie (Il. 3). Jest to układ pompowy, oparty na podobnych założeniach, co układy na których wcześniej pracowałem. Celem było tu uzyskanie komplementarności wyników w zakresie całego programu badawczego, realizowanego w Katedrze. Sekcja pomiarowa jest taka sama, jak parownik obiegu termosyfonowego - jest to moduł wymienny pomiędzy stanowiskami [1].

Budowę w. wym. stanowisk poprzedzała budowa przedprototypu termosyfonu. Przeprowadziłem kompleksowe badania eksperymentalne w szerokim zakresie zjawisk i parametrów. W szczególności, celem było rozpoznanie sposobu pracy obiegu termosyfonowego i powiązanie tej wiedzy z analizą zjawisk występujących w parowniku. Wykazałem możliwość uzyskania efektywnej pracy układu w oparciu o przyjęte założenia - będzie to przyczynkiem do dalszych badań o charakterze stosowanym i ewentualnych wdrożeń. Następnie, program badań rozszerzyłem o poboczne wątki - kompleksowe

podejście do wymiany ciepła podczas wrzenia w minigeometriach (także minikanałowych) i nierównomierność rozptyłu czynnika w minigeometriach. Pozwoliło to na lepsze poznanie tych zjawisk i poszerzenie stanu wiedzy w zakresie badań podstawowych. Jest to istotny wkład, ponieważ geometria miniszczelinowa ciągle stanowi pewną lukę w literaturze przedmiotu. Na podstawie uzyskanych wyników opublikowałem 7 artykułów w recenzowanych, punktowanych czasopismach.

Na podstawie wskaźników, można przyjąć, że kierowanie wyżej opisanym projektem badawczym oraz uczestnictwo w innych pracach realizowanych w Jednostce przyczyniło się do znaczącego zwiększenia moich kompetencji naukowych - H-index: 1 --> 5, liczba cytowań (bez autocytowań): 2 --> 37, z czego radykalny wzrost przypada na ostatnie lata. Znaczący też jest rozwój kompetencji mgr. inż. Pawła Dąbrowskiego, będącego jednym z głównych wykonawców badań pod moim kierownictwem. Wyodrębniony wątek nierównomierności rozptyłu czynnika w minigeometriach stał się tematem realizowanego przez niego projektu PRELUDIUM i jest też tematem jego przyszłej rozprawy doktorskiej, planowanej do złożenia jeszcze w bieżącym roku. Jestem promotorem pomocniczym tej pracy.

Trwałym efektem opisanych prac jest znaczna rozbudowa infrastruktury badawczej Katedry - powstały dwa w pełni opomiarowane i funkcjonalne stanowiska pomiarowe oraz funkcjonalny prototyp, który może posłużyć do celów dydaktycznych.

W ramach realizacji badań powstał zespół, którego działalność będzie kontynuowana. Zebrana baza danych eksperymentalnych jest wystarczająca do kontynuowania prac teoretycznych i stworzenia na tej podstawie map przepływu oraz dalszej weryfikacji modelu teoretycznego przepływów dwufazowych, rozwijanego w Jednostce. Stanowisko pomiarowe pozwala na badania kondensacji w przepływie, innych geometrii wymiennika i innych czynników roboczych. Obieg termosyfonowy może być obiektem kolejnych modyfikacji, włączając w to np. doprowadzanie ciepła do parownika na sposób radiacyjny. Wszystko to daje możliwości dalszego rozwijania programu badań, po ewentualnym uzyskaniu przeze mnie stopnia naukowego doktora habilitowanego.

4.3. Wpływ osiągnięcia naukowego na dyscyplinę naukową

Zagadnienia wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie są przedmiotem zwiększonego zainteresowania badaczy od dłuższego czasu, jednak dotychczas skupiali się oni głównie na minikanałach. O wiele mniej prac poświęcono geometrii miniszczelinowej, choć z punktu widzenia aplikacji praktycznych ma ona pewne zalety. Realizując opisane wyżej badania przyczyniłem się do wypełnienia tej luki, poddając systematycznej analizie wymianę ciepła podczas wrzenia w przepływie przez miniszczeliny, pod kątem określenia współczynników przejmowania ciepła i spadków ciśnienia i porównując z adekwatnymi pakietami minikanałów [1]. Koncepcja badań jest rozwinięciem wcześniejszych prac (w tym moich badań) prowadzonych w Jednostce dla pojedynczych minikanałów. Wykazałem stosowność od szeregu lat rozwijanej w Jednostce korelacji Mikieliewicza dla kolejnej geometrii. Podjąłem też próbę intensyfikacji wymiany ciepła za pomocą prostej, pasywnej metody. Efekt okazał się negatywny, co pokrywa się z obserwacjami i wnioskami z mojej pracy doktorskiej. Zaobserwowałem jednak korzystny wpływ zastosowanej techniki na równomierność rozptyłu czynnika.

W ramach badań wymiennika z minigeometrią, który miał zostać wykorzystany jako parownik w modelowym obiegu termosyfonowym, zwróciłem uwagę na zagadnienie nierównomierności rozdziału czynnika (ang. flow maldistribution). Aby zapewnić komplementarność z innymi badaniami

prowadzonymi w Jednostce, jako konfigurację referencyjną przyjąłem pakiet równoległych minikanatów z kolektorami trapezowymi (tzw. układ "Z"). Jest to stosunkowo nowy obszar zainteresowania badaczy. Zidentyfikowałem podstawowe mechanizmy blokowania kanałów i wpływ parametrów pracy na to zjawisko [4][5].

Obecnie w wielu dziedzinach techniki obserwować możemy renesans prostych, pasywnych rozwiązań. Przyczyny to, oczywiście, oszczędność energii i zmniejszenie awaryjności poprzez eliminację części ruchomych oraz komponentów elektrycznych czy elektronicznych. Rozwój techniki solarnej i konieczność transportu ciepła z wyższego poziomu na niższy, kieruje zainteresowanie ku termosyfonom odwróconym. Swoimi badaniami przyczyniłem się do lepszego poznania i opisanie wydajnego i konstrukcyjnie prostego rozwiązania - termosyfonu odwróconego z parowym podnośnikiem cieczy i jednym czynnikiem roboczym [2][3].

Na każdym etapie prac dużą uwagę poświęcałem rejestracji wizualnej zjawisk przepływowych. Powstał w ten sposób bogaty materiał, pozwalający na jakościową analizę wyżej opisanych zagadnień, a także mogący stanowić atrakcyjną ilustrację wykładów poświęconych zjawiskom cieplno-przepływowym w minigeometriach.

4.4. Wykaz prac opublikowanych w ramach osiągnięcia naukowego

4.4.1. Publikacje recenzowane z listy Journal Citation Reports (JCR), wg Web of Science

- [1] Klugmann, Michał; Dabrowski, Paweł; Mikielwicz, Dariusz; Flow distribution and heat transfer in minigap and minichannel heat exchangers during the flow boiling; Applied Thermal Engineering; 2020; 5-letni Impact Factor: 4,026
- [2] Klugmann, Michał; Dabrowski, Paweł; Mikielwicz, Dariusz; Flow Boiling in Minigap in the Reversed Two-Phase Thermosiphon Loop; ENERGIES; Vol. 12; Nr 17; 2019; 5-letni Impact Factor: 2,822; Liczba cytowań: 1
- [3] Klugmann, Michał; Dabrowski, Paweł; Mikielwicz, Dariusz; Selected thermal and flow issues in a reversed thermosiphon with a steam liquid lifter; E3S Web of Conferences; Vol. 70; Art nr: UNSP 02009; 2018; Liczba cytowań: 1
- [4] Klugmann, Michał; Dabrowski, Paweł; Mikielwicz, Dariusz; Pressure drop related to flow maldistribution in a model minichannel plate heat exchanger; ARCHIVES OF THERMODYNAMICS; Vol. 39; Nr 2; Str. 123-146; 2018; Liczba cytowań: 4
- [5] Dabrowski, Paweł; Klugmann, Michał; Mikielwicz, Dariusz; Selected studies of flow maldistribution in a minichannel plate heat exchanger; ARCHIVES OF THERMODYNAMICS; Vol. 38; Nr 3; Str. 135-148; 2017; Liczba cytowań: 6

4.4.2. Publikacje recenzowane spoza listy Journal Citation Reports (JCR)

- [6] Dąbrowski, Paweł, Klugmann, Michał, Mikielwicz, Dariusz; Flow maldistribution and its mitigation in mini heat exchangers; Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer; Publishing House of the Koszalin University of Technology; Str. 83-109; 2019
- [7] Dąbrowski, Paweł, Klugmann, Michał, Mikielwicz, Dariusz; Channel Blockage and Flow Maldistribution during Unsteady Flow in a Model Microchannel Plate heat Exchanger; Journal of Applied Fluid Mechanics; Vol. 12; Nr 4; Str. 1023-1035; 2019; Impact Factor: 0,689

4.4.3. Aktywności konferencyjne (w tym publikacje w materiałach konferencyjnych)

- [a] Klugmann, Michał; Dąbrowski, Paweł; Mikielawicz, Dariusz; Flow boiling visualization in a minigap plate heat exchanger; SOHMT-2019; 16-19 września 2019; Kołobrzeg
- [b] Klugmann, Michał; Dąbrowski, Paweł; Mikielawicz, Dariusz; Problems of heat and mass transport in reversed thermosiphon circuit with a minigap evaporator used as steam liquid lifter; ECOS-2019; 23-28 czerwca 2019; Wrocław
- [c] Klugmann, Michał; Dąbrowski, Paweł; Mikielawicz, Dariusz; Heat transfer and flow specifics in minigap during the flow boiling; ECOS-2019; 23-28 czerwca 2019; Wrocław
- [d] Klugmann, Michał; Dąbrowski, Paweł; Mikielawicz, Dariusz; The concept of application of the minigap evaporator in the reversed two-phase thermosiphon circuit; LTHU-2018; 25-26 października; Brema
- [e] Klugmann, Michał; Dąbrowski, Paweł; Mikielawicz, Dariusz; Selected thermal and flow issues in a reversed thermosiphon with a steam liquid lifter; HTRSE-2018; 2-5 września 2018; Międzyzdroje
- [f] Klugmann, Michał; Dąbrowski, Paweł; Mikielawicz, Dariusz; Flow Maldistribution in Microchannel Heat Exchangers; The 53 rd European Two - Phase Flow Group Meeting; 22-24 maja 2017; Gdańsk – **członek komitetu organizacyjnego**
- [g] Klugmann, Michał; Dąbrowski, Paweł; Mikielawicz, Dariusz; Flow Maldistribution in Microchannel Heat Exchangers; XXIII Zjazd Termodynamików; 19-22 września 2017; Beskid Śląski

5. Omówienie wybranych osiągnięć nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego, ale istotnie wzbogacających dorobek wnioskodawcy w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych**5.1. Badania wymiany ciepła, spadku ciśnienia i intensyfikacji wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie przez minikanaly**

Przełom XX i XXI wieku to początek powszechnej cyfryzacji mediów i telekomunikacji, która wymaga niewyobrażalnych jeszcze ćwierć wieku temu mocy obliczeniowych. W tym czasie częstotliwości taktowania mikroprocesorów z megahertzów zwiększyły się więc do gigahertzów, wielokrotnie zwiększyła się też ich skala integracji, podczas gdy dostępne powierzchnie wymiany ciepła (i ilości miejsca w obudowach) uległy drastycznemu pomniejszeniu. Dlatego od lat 90-tych XX wieku obserwowany jest szybki postęp w badaniach transportu ciepła i masy w mikro- i nanoskali. Wcześniej, także w Katedrze Energetyki i Aparatury Przemysłowej WM PG, przedmiotem zainteresowania badaczy była wymiana ciepła podczas przemian fazowych w urządzeniach wielkoskalowych.

Przystępując do studiów doktoranckich dołączyłem więc do rozwiniętego programu badawczego, realizowanego m.in. pod kierunkiem prof. Dariusza Mikielawicza, przyszłego promotora mojej pracy doktorskiej. Gdy rozpoczynałem badania, stan wiedzy literaturowej na temat wrzenia w przepływie przez minikanaly nie prowadził jeszcze do jednoznacznych konkluzji.

Aktualnym problemem badaczy było poszukiwanie odpowiedzi na następujące pytania:

- W jaki sposób wymiary kanału wpływają na dynamikę pęcherzyka parowego oraz przepływ dwufazowy?
- Jak wymiar kanału wpływa na proces wymiany ciepła i na spadek ciśnienia?
- Czy metody intensyfikacji wymiany ciepła, stosowane z powodzeniem dla kanałów konwencjonalnych, mogą znaleźć zastosowanie dla małych średnic?
- W przypadku kryzysów wrzenia w minikanalach zagadnieniem wymagającym rozwiązania było lokalizowanie punktu wysychania filmu cieczowego na ścianie kanału.
- Badania kondensacji w przepływie również dotyczyły wymiany ciepła i spadku ciśnienia, ważne jednak było zwrócenie uwagi na specyfikę tego procesu, nie będącego symetrycznym odbiciem wrzenia w przepływie. Ważnym celem było też uchwycenie lokalnych współczynników przejmowania ciepła.

Przedmiotem mojej pracy doktorskiej i trzech kolejnych projektów badawczych, w których pełniłem rolę głównego wykonawcy po uzyskaniu stopnia doktora, były pojedyncze, pionowe minikanaly srebrne, w których badane były: jednofazowa wymiana ciepła, wrzenie w przepływie [8][11][12], kryzys wrzenia wraz z wymianą pokryzysową oraz kondensacja w przepływie [10]. Przepływ był wymuszony pompą, grzanie minikanalów realizowane było elektrycznie. Średnice minikanalów obejmowały zakres $1.15 \div 2.3$ mm. Przebadano perspektywiczne czynniki robocze: R123, R134a, SES36, HFE7000 i HFE7100, które potencjalnie mogą znaleźć zastosowanie w obiegach Rankine'a z czynnikiem organicznym, czy w wysokotemperaturowych pompach ciepła. Dużą uwagę poświęciłem uchwyceniu lokalnego rozkładu ciśnienia na długości badanego kanału i kontrakcji na wlocie i wylocie. W celu rejestracji pełnego rozkładu temperatury na ścianie minikanalu zastosowałem technikę termograficzną. Okazała się ona bardzo skuteczna w lokalizowaniu punktu wystąpienia kryzysu wrzenia, czyli wyschnięcia filmu cieczowego na ścianie kanału. Było to nowatorskie podejście. Istotnym, w owym czasie, osiągnięciem było też zarejestrowanie pełnego spektrum struktur wrzenia i kondensacji w minikanalach. W swoich badaniach do technik wizualizacyjnych (w tym termografii) wracałem potem jeszcze wiele razy, gdyż pozwalało to wykorzystać moje zainteresowania (i doświadczenie) w zakresie fotografii i rejestracji wideo do wzbogacenia jakościowego opisu zjawisk.

Konkluzje z badań wrzenia i kondensacji w przepływie, w których uczestniczyłem po uzyskaniu stopnia doktora:

1. Badania z użyciem kamery termowizyjnej umożliwiły dokładną rejestrację rozkładu temperatury ścianki. W zakresie przepływu dwufazowego, potwierdzone zostały zaobserwowane uprzednio rozkłady współczynnika przejmowania ciepła w kształcie litery M. Ponadto możliwe było precyzyjne określanie miejsca wystąpienia kryzysu wrzenia, a, co za tym idzie, długości krytycznej i krytycznego stopnia suchości.
2. W ramach badania kryzysów wrzenia, wykazano wpływ dostarczanego strumienia ciepła na długość krytyczną i krytyczny stopień suchości. Wraz ze wzrostem gęstości strumienia ciepła następowało zmniejszenie długości krytycznej ale także wartości krytycznego stopnia suchości przy stałym masowym natężeniu przepływu.
3. Wraz ze wzrostem masowego natężenia przepływu zaobserwowano wyraźny spadek krytycznego stopnia suchości. Spadek ten staje się bardziej intensywny wraz ze zwiększaniem średnicy kanału.

4. Na podstawie eksperymentalnej bazy danych dla obszaru kryzysu wrzenia zaproponowano korelację empiryczną, która wykazuje zgodność w zakresie błędu $\pm 30\%$ dla wszystkich danych doświadczalnych.
5. W ramach badań kondensacji w przepływie zebrano bazę danych eksperymentalnych dotyczących spadków ciśnienia oraz współczynnika przejmowania ciepła podczas kondensacji w przepływie w kanałach o małej średnicy dla kilku czynników. Baza danych wynosi razem ponad 1000 punktów eksperymentalnych. Bazę danych porównano z opracowanym własnym modelem dotyczącym spadków ciśnienia oraz wymiany ciepła. Model własny okazał się najlepszym spośród przetestowanych korelacji literaturowych (zalecanych do obliczeń inżynierskich).
6. W badaniach eksperymentalnych kondensacji w przepływie uzyskałem rozkłady temperatur ścianki na długości badanej sekcji pomiarowej oraz spadki ciśnień współczynniki przejmowania ciepła. Przeprowadziłem wizualizację przepływu w warunkach adiabatycznych w kanale okrągłym wykonanym w szkłe kwarcowym za pomocą zdjęć w świetle stroboskopowym.

5.2. Badania z zakresu materiałoznawstwa [9]

W badaniach uszkodzeń uderzeniowych kompozytów - polimerów wzmocnionych włóknem węglowym (CFRP) zaproponowałem wykorzystanie termografii ciekłokrystalicznej do wizualizacji pęknięć. Było to nowe, alternatywne podejście do badań nieniszczących. Metoda TLC została następnie porównana z innymi metodami: konwencjonalną radiografią komputerową (CR) i termowizją. Rozrzut wyników dotyczących średniej długości pęknięcia, pomiędzy metodami termograficznymi a metodą CR, wynosił $\pm 5\%$. Obszar uszkodzenia wykazywał podobny kształt dla obu technik termograficznych, natomiast pod względem ilościowym różnica w stosunku do metody CR wynosiła $\pm 2\%$. Badania porównawcze dowiodły, że metoda TLC jest pełnoprawnym i dokładnym narzędziem do diagnostyki uszkodzeń uderzeniowych CFRP. Główne zalety nowej metody to:

- niski koszt, głównie folii TLC,
- możliwość zastosowania konwencjonalnego cyfrowego sprzętu rejestrującego,
- niskie reżimy dotyczące warunków badań (metoda nadaje się do zastosowania "w terenie").

5.3. Wykaz publikacji z listy Journal Citation Reports (JCR) z dziedziny nauk inżyniero-technicznych nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

- [8] Jakubowska, Blanka; Mikielwicz, Dariusz; Klugmann, Michał; Experimental study and comparison with predictive methods for flow boiling heat transfer coefficient of HFE7000; INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER; Vol. 142; Art Nr: 118307; 2019; 5-letni Impact Factor: 4,662; Liczba cytowań: 2
- [9] Strugała, Gabriel; Klugmann, Michał; Landowski, Michał; Szkodo, Marek; Mikielwicz, Dariusz; A universal NDT method for examination of low energy impact damage in CFRP with the use of TLC film; Nondestructive Testing and Evaluation; Vol. 33; Nr 3; Str. 315-328; 2018;
- [10] Mikielwicz, Dariusz; Wajs, Jan; Andrzejczyk, Rafał; Klugmann, Michał; Pressure drop of HFE7000 and HFE7100 during flow condensation in minichannels; INTERNATIONAL JOURNAL

OF REFRIGERATION-REVUE INTERNATIONALE DU FROID; Vol. 68; Str. 226-241; 2016; 5-letni Impact Factor: 3,655; Liczba cytowań: 12

- [11] Mikielwicz, Dariusz; Klugmann, Michał; Wajs, Jan; Flow boiling intensification in minichannels by means of mechanical flow turbulising inserts; INTERNATIONAL JOURNAL OF THERMAL SCIENCES; Vol.65; Str. 79-91; 2013; 5-letni Impact Factor: 3,893; Liczba cytowań: 7
- [12] Mikielwicz, Dariusz; Klugmann, Michał; Wajs, Jan; Experimental Investigation of M-Shape Heat Transfer Coefficient Distribution of R123 Flow Boiling in Small-Diameter Tubes; HEAT TRANSFER ENGINEERING; Vol. 33; Nr 7; Str. 584-595; 2012; 5-letni Impact Factor: 1,707; Liczba cytowań: 9

5.4. Wybrane aktywności konferencyjne (w tym publikacje w materiałach konferencyjnych) z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych nie wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

- [g] Klugmann, Michał; Mikielwicz, Dariusz; Selected aspects of two-phase flow studies using different visualization techniques in minichannels; HTRSE-2016; 10-13 września 2016; Międzyzdroje
- [h] Mikielwicz, Dariusz; Klugmann, Michał; Andrzejczyk, Rafał; Wajs, Jan; Experimental investigations on pressure drop during the condensation in flow of HFE7000 in vertical minichannel; HTRSE-2014; 10-13 września 2014; Międzyzdroje
- [i] Mikielwicz, Dariusz; Klugmann, Michał; Andrzejczyk, Rafał; Wajs, Jan; Experimental investigations on condensation in flow of HFE-7100 in small diameter channels; HTRSE-2012; wrzesień 2012; Międzyzdroje
- [j] Mikielwicz, Dariusz; Klugmann, Michał; Wajs, Jan; Experimental investigations on condensation in flow in small diameter channels; 1-st International Congress on Thermodynamics; 4-7 września 2011; Poznań
- [k] Mikielwicz, Dariusz; Klugmann, Michał; Wymiana ciepła podczas wrzenia w przepływie przy zastosowaniu wkładek blokujących; SWCIM-2010; 6-9 września 2010; Międzyzdroje
- [l] Mikielwicz, Dariusz; Klugmann, Michał; Tesmar, Joanna; Wrzenie w przepływie w kanałach o małych średnicach; XIII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy; 3-6 września 2007; Koszalin-Darłowo
- [m] Mikielwicz, Dariusz; Mikielwicz, Jarosław; Białas-Tesmar, Jonanna; Klugmann, Michał; A semi-empirical method for calculation of flow boiling heat transfer coefficients for conventional channels and small diameter tubes; HTRSE-2006; 13-16 września 2006; Międzyzdroje

5.5. Udział w projektach badawczych finansowanych ze źródeł zewnętrznych

1. Heat transfer intensification during the flow boiling in small diameter channels (Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego); 2005-2007; główny wykonawca
2. Investigations of critical heat flux in small diameter channels (Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego); 2006-2009; główny wykonawca

3. Theoretical and experimental investigations on condensation in flow in small diameter horizontal and vertical channels (Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego); 2009-2012; główny wykonawca
4. Intensification of heat exchange in two-phase thermosyphon equipped with minigap evaporator (Narodowe Centrum Nauki); 2016-2020; kierownik projektu
5. Experimental investigations and modelling of the working fluid distribution in minichannel and minigap plate heat exchangers (Narodowe Centrum Nauki); 2018-2020; wykonawca

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

Prowadzone przeze mnie zajęcia w ramach podstawowego programu studiów I i II stopnia na Wydziale Mechanicznym są z reguły dobrze i bardzo dobrze oceniane przez studentów. Średnia ocen ze wszystkich ankiet studenckich z lat 2011-2019 wynosi 4.31, przy czym, w okresie ostatnich 4 lat widoczna jest tendencja wzrostowa. Ponadto, prowadzę dwa przedmioty o charakterze autorskim, z samodzielnie sformułowanym programem. Są one poświęcone technikom termograficznym oraz historii techniki, czyli zagadnieniom które, obok wymiany ciepła, są przedmiotem mojego naukowego zainteresowania.

6.1. Przedmioty prowadzone w ramach podstawowego programu studiów

- Wymiana i wymienniki ciepła: wykład (w j. polskim), laboratorium (w j. polskim i angielskim)
- Termodynamika: ćwiczenia (w j. polskim), laboratorium (w j. polskim i angielskim)
- Komunikacja profesjonalna w języku angielskim: seminarium - tematy skupiają się na szeroko pojętej energetyce oraz na historii techniki
- Inżynieria ochrony środowiska: wykład i laboratorium (w j. polskim)

6.2. Przedmioty autorskie

6.2.1. Wykład „Losy Cywilizacji”, dawniej „Historia i Zabytki Techniki”

Przedmiot prowadzę od 2016 r. w ramach ogólnouczelnianego bloku przedmiotów humanistycznych i społecznych. Prowadzony jest w wymiarze 30 godzin, dla grupy wykładowej liczącej około 150 osób. Ilustrowany jest bardzo dużą kolekcją rekwizytów i materiałów multimedialnych (z czego wiele jest mojego autorstwa i pochodzi z własnych badań), zawiera bogaty wątek popularyzujący naukę. Celem, jaki sobie postawiłem, można powiedzieć – swoistą misją – ma być przywrócenie świadomości znaczenia podbudowy humanistycznej w pracy inżyniera, a także wrażliwienie na wartość dziedzictwa, jego rolę kulturotwórczą i konieczność ochrony.

6.2.2. Wykład „Termografia w IM-M” wraz z laboratorium

Przedmiot prowadzę dla studiów II stopnia na kierunku Inżynieria Mechaniczno-Medyczna, w wymiarze 15 godzin wykładu i 15 godzin laboratorium. Celem przedmiotu jest zapoznanie słuchaczy z technikami rejestracji rozkładów temperatury – termografią ciekłokrystaliczną i termowizją. Przy czym, temat ten omawiam szeroko i przekrojowo, nie odnosząc się tylko do metod diagnostyki medycznej, lecz także starając się dostarczyć wiedzę przydatną we wszelkich badaniach, w których

wymagana jest rejestracja rozkładu temperatury i jego zmian w czasie metodami bezstykowymi. Przedmiot ilustrowany jest ciekawymi materiałami wizualnymi, m.in. filmami pokazującymi wykorzystanie termografii w monitorowaniu przepływów krwi podczas zabiegów operacyjnych.

Zwięzły skrót w. wym. wiedzy przekazuję też ogółowi studentów w ramach ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotów Wymiana Ciepła, Wymiana i Wymienniki Ciepła oraz Heat Transfer (zajęcia w j. angielskim).

6.3. Osiągnięcia organizacyjne i działania popularyzujące naukę

Z działań organizacyjnych, które można zaliczyć do obszaru osiągnięcia naukowego, wymienić mogę aktywny udział w Komitecie organizacyjnym 53rd European Two-Phase Flow Group Meeting.

Wykazuję stałą, wyróżniającą się aktywność w aplikowaniu o fundusze zewnętrzne na prowadzenie badań - systematyczne zgłoszenia w konkursach krajowych (np. organizowanych przez Narodowe Centrum Nauki) oraz międzynarodowych, zakończone sukcesem (m.in. ukończony 16 kwietnia 2020 r. grant w ramach konkursu SONATA) lub osiągające wysokie notowania w recenzjach.

Uczestniczę w egzaminach dyplomowych w charakterze członka komisji, także na innych wydziałach – Elektrotechniki i Automatyki oraz Oceanotechniki i Okrętownictwa. Współpracuję z innymi wydziałami jako ekspert do spraw zabytków techniki, a także jako recenzent prac dyplomowych nawiązujących do zagadnień związanych z zabytkami techniki. Można tu wymienić Wydział Architektury, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska i ponownie Wydział Elektrotechniki i Automatyki.

Z otoczenia gospodarczego i naukowego, mogę wymienić następujące podmioty z którymi prowadzę aktywną współpracę: Gdańska Infrastruktura Wodociągowo-Kanalizacyjna Sp. z o.o., Saur Neptun Gdańsk S.A., Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska, Archiwum Państwowe w Gdańsku, Biblioteka Gdańska PAN, miejskie i wojewódzkie służby konserwatorskie, Narodowy Instytut Dziedzictwa (więcej w pkt. 7).

Od wielu lat jestem główną osobą w KEiAP odpowiedzialną za organizację imprez popularyzacyjnych na terenie Jednostki. Działania te prowadzę, między innymi, w ramach:

- Dni Otwartych PG (we współpracy z Politechniką Otwartą),
- Bałtyckiego Festiwalu Nauki (także z dofinansowaniem WFOŚ),
- Europejskiej Nocy Muzeów (we współpracy z Politechniką Otwartą i Sekcją Historyczną Biblioteki Głównej PG),
- okazjonalnych pokazów i wycieczek dla gości Uczelni.

W ramach tych imprez łączę oba wątki moich zainteresowań naukowych, czyli technikę ciepłą i historię techniki. Wątek techniki ciepłej w szczególności poświęcony jest miernictwu cieplnemu (z uwzględnieniem technik termograficznych), wątek historii techniki dotyczy w dużej mierze powstania politechniki w Gdańsku, oraz całego technicznego kontekstu, w którym ona powstawała (rewolucja przemysłowa, rozwój infrastruktury energetycznej, wodociągowo-kanalizacyjnej, itp.). Poruszam także inne zagadnienia, związane z powszechną historią techniki, a także aspekty ekologiczne, dotyczące eksploatacji i ochrony zasobów wody pitnej (pokazy z dofinansowaniem WFOŚ).



Ilustracja 7. Imprezy Bałtyckiego Festiwalu Nauki i zjazd absolwentów rocznika 1969

Formy wyżej wymienionych działań to: wykłady, pokazy i spacer historyczny. Ilustruję je pokaznym zbiorem rekwizytów, historycznych dokumentów i materiałów multimedialnych mojego autorstwa.

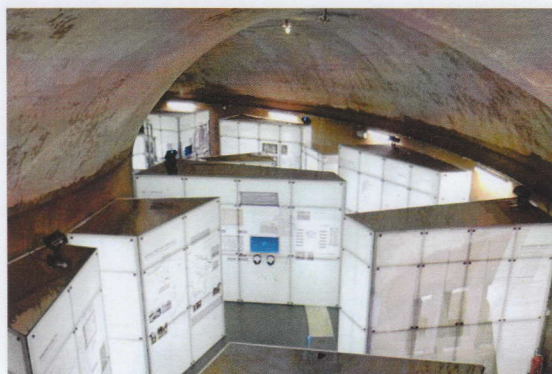
7. Inne informacje, ważne z punktu widzenia kariery zawodowej

Jako drugi wątek naukowego zainteresowania, prowadzę szeroką działalność związaną z badaniem, ratowaniem i ochroną zabytków techniki. Są to zarówno zabytki ruchome - w dużej części związane z Politechniką Gdańską, jak również zabytki nieruchome techniki na terenie Trójmiasta (w szczególności związane z techniką wodociągowo-kanalizacyjną i obronnością). Działalność ta jest rozpoznawalna i pozytywnie postrzegana w środowisku konserwatorskim.

Instytucje i organizacje z którymi współpracowałem lub współpracuję obecnie na rzecz ochrony zabytków techniki:

- Gdańska Infrastruktura Wodociągowo-Kanalizacyjna – jako kierownik projektu Gdańskiego Szlaku Wodociągowego (faza koncepcyjna i projektowa) w latach 2010-2015,
- Gdańska Infrastruktura Wodociągowo-Kanalizacyjna - jako konsultant merytoryczny/nadzór autorski projektu Gdańskiego Szlaku Wodociągowego (faza realizacji) w latach 2015-2017,
- Stowarzyszenie "Gertruda" - jako wiceprezes zarządu i społeczny opiekun zabytków w latach 2009-2014,
- Gdyński Klub Eksploracji Podziemnej - od 2010 roku, także jako członek zarządu,
- Sekcja Historyczna Biblioteki Głównej PG - od 2016 roku,
- Miejski Konserwator Zabytków, Sopot - od 2018 roku,
- Pomorski Wojewódzki Urząd Ochrony Zabytków - od 2019 roku.

Projekt **Gdańskiego Szlaku Wodociągowego**, formalnie rozpoczęty w 2010 roku, był zwieńczeniem oddolnych działań, które zainicjowałem 2 i pół roku wcześniej, mających na celu ocalenie przed zniszczeniem i rewitalizację dwóch spektakularnych zabytków infrastruktury wodociągowej: zbiornika wody Stara Orunia (1869) i zbiornika wody Stary Sobieski (1911) [13][16]. W efekcie realizacji projektu oba obiekty zostały wyremontowane i udostępnione do zwiedzania. W zbiorniku Stary Sobieski powstała ekspozycja muzealna. W zakres przedsięwzięcia weszło też udostępnienie dla turystów współczesnego zbiornika wody (wieży ciśnień) Kazimierz na Wyspie Sobieszewskiej – urządzono tam punkt widokowy i ekspozycję.



Ilustracja 8. Zabytkowy podziemny zbiornik wodny po kapitalnym remoncie i ekspozycja w jego wnętrzu

W ramach projektu prowadziłem szerokie badania historyczne, w tym wykopaliska archeologiczne [14][17]. Zebrana została pokaźna kolekcja eksponatów. Doprowadziłem do uporządkowania stanu prawnego wyżej wymienionych obiektów oraz historycznej dokumentacji gdańskiego systemu wodociągowo-kanalizacyjnego. Trójstronna komisja (GIWK – SNG – Archiwum Państwowe), powołana z mojej inicjatywy i pod moim kierownictwem nadzorowała zebranie i przekazanie tego zasobu do Archiwum Państwowego. Zajmowałem się jego digitalizacją.

Stowarzyszenie „Gertruda” zostało założone w celu uporządkowania stanu prawnego i poprawy losu wybranych obiektów zabytkowych na terenie Gdańska. Udało się to np. w przypadku Bastionu św. Gertrudy, Szańca Jezuickiego czy kolejowej nastawni bramowej w Gdańsku-Wrzeszczu. W ramach działalności Stowarzyszenia powstała też wartościowa dokumentacja obiektów zabytkowych dla służb konserwatorskich.

Gdyniński Klub Eksploracji Podziemnej opiekuje się schronem z czasów II Wojny Światowej w Gdyni-Leszczynkach, prowadzi szeroką działalność edukacyjną z zakresu historii i obronności, a także zabiega o ochronę wielu obiektów na terenie Gdyni.

Moja współpraca z **Sekcją Historyczną Biblioteki Głównej PG** dotyczy głównie zabezpieczenia i ewidencji zabytków ruchomych, związanych z Politechniką Gdańską oraz archiwizacji starych fotografii. W pracy nad ewidencją szeroko zaangażowani są studenci w ramach przedmiotu omówionego w pkt. 6.2.1.

Moja współpraca ze **służbami konserwatorskimi** dotyczy ochrony zabytków nieruchomych techniki na terenie Gdańska i Sopotu. Jej efektem jest kilkanaście wpisów do Ewidencji Zabytków oraz jeden (jak dotąd) wpis do Rejestru Zabytków Województwa Pomorskiego [18].

Na marginesie zaangażowania w ochronę zabytków, uczestniczę także w działaniach związanych z ochroną nietoperzy, których siedliska znajdują się w wielu historycznych obiektach. W tym zakresie współpracuję z **Wojewódzkim Inspektorem Ochrony Środowiska** w Gdańsku i **Polskim Towarzystwem Ochrony Przyrody „Salamandra”**.

Opisane działania nie mają bezpośredniego związku z osiągnięciem habilitacyjnym, ale mają w dużej mierze charakter naukowy oraz związek z moimi osiągnięciami w zakresie dydaktyki i popularyzacji nauki. Zdecydowanie przyczyniły się też do zwiększenia moich kompetencji w zakresie zarządzania projektami i pracy zespołowej - wyróżnić należy tu projekt Gdańskiego Szlaku Wodociągowego, realizowany w zespole 3-4 osobowym, o znacznym budżecie (niemal 9 000 000 zł) i z dofinansowaniem z UE.

7.1. Wykaz publikacji z dziedziny historii techniki

- [13] Klugmann, Michał; Instalacja oświetleniowa w zbiorniku wody "Stary Sobieski" - rozważania o spektakularnym zabytku techniki; Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej; Nr 45; Str. 41-48; 2015
- [14] Klugmann, Michał; Z pamięci wody. Wyjątki o pionierach gdańskich wodociągów i pogmatwanych losach ich dzieł; Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna; Nr 9; Str. 350-358; 2016
- [15] Klugmann, Michał; Co zrobić z nieużywaną wieżą ciśnień? Studium historyczno-koncepcyjne; Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna; Nr 4, str. 129-141; Nr 5, str. 192-196; 2017
- [16] Klugmann, Michał; Po drugiej stronie kranu, po drugiej stronie płotu. Tajemnicze sąsiedztwo Politechniki Gdańskiej; Pismo PG; Nr 1, str. 61-63; Nr 2, str. 43-47; Nr 3, str. 61-64; 2018
- [17] Klugmann, Michał; Dziedzictwo 150 lat rozwoju techniki wodociągowej na terenie Gdańska i Sopotu; IX Forum Dziedzictwa Sztuki Inżynieryjnej; 13-14 czerwca 2019 - przyszły rozdział monografii, obecnie dostępny on-line: <http://smsi.com.pl/category/baza-wiedzy/>
- [18] Hryszkiewicz-Kahlau, Dorota; Klugmann, Michał; Historia terenu dawnego Szpitala Miejskiego w Gdańsku; Ochrona Zabytków; Wydawnictwo Narodowego Instytutu Dziedzictwa - artykuł złożony do publikacji w 2021 r., po pozytywnej recenzji

8. Podsumowanie

W mojej ocenie, od czasu uzyskania stopnia doktora, udało mi się wnieść istotny wkład w badania nad zagadnieniami wymiany ciepła i zjawiskami przepływowymi w minigeometriach. Jest to tematyka aktualna i bardzo ważna z punktu widzenia potrzeb dzisiejszej techniki, ale zawierająca jeszcze wiele obszarów niewystarczająco przebadanych – w mojej działalności naukowej starałem się świadomie wypełniać te luki. Szczególnie prace, które pojąłem na przestrzeni ostatnich 4 lat, a które składają się na opisywane osiągnięcie habilitacyjne, doprowadziły do wielu ważnych obserwacji, uzupełniających stan wiedzy w dziedzinach dopiero od niedawna szerzej opisywanych. W tym czasie radykalnie zwiększył się mój dorobek naukowy, zaś kierowanie własnym grantem pozwoliło nabyć kompetencje w zakresie kierowania zespołem badawczym, planowania i koordynowania prac badawczych, a także rozpoznać związane z tym aspekty formalne i organizacyjne. Można powiedzieć, że osiągnąłem w ten sposób dojrzałość naukową, co pozwoli mi w przyszłości tworzyć nową tematykę badawczą oraz budować zespoły badawcze.

Uważam, że z punktu widzenia ogólnie pojętej misji społecznej środowiska akademickiego, moja równoległa działalność związana z propagowaniem historii techniki i ochroną zabytków techniki zasługuje na dostrzeżenie. Wzorem, czy też punktem odniesienia, zawsze byli dla mnie naukowcy interdyscyplinarni, tzw. ludzie renesansu, którzy ogarniali horyzonty znacznie wykraczające poza dziedziny ich podstawowej aktywności i, oprócz nauki, kształtowali też kulturę. Z tego powodu, wkład w program nauczania przedmiotów humanistycznych i społecznych w uczelni technicznej postanowiłem wnieść całkowicie świadomie, zdając sobie sprawę z tego, że podbudowa humanistyczna w pracy inżyniera-naukowca czy inżyniera-artysty ma wielkie znaczenie. Po części, czułem się też do tego zobowiązany pracując w uczelni o bardzo długiej historii i w budynku o wyrafinowanej architekturze. Szeroka współpraca z przedsiębiorstwami, instytucjami kultury i z otoczeniem naukowym, chociaż niezwiązana bezpośrednio z osiągnięciem habilitacyjnym, ukształtowała – wyróżniając się, w mojej ocenie – kompetencje organizacyjne i dyplomatyczne, które mogą zapoczątkować w przyszłości.

29.09.2020, H.E.