

Załącznik 3

Do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

AUTOREFERAT

Badania eksperymentalne generatorów strugi syntetycznej

Dr inż. Paweł Gil

Zakład Termodynamiki

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Politechnika Rzeszowska

al. Powstańców Warszawy 8, 35-082 Rzeszów

Rzeszów, 2023 r.

Spis treści:

| | |
|--|----|
| 1. Imię i Nazwisko: Paweł Gil..... | 4 |
| 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:..... | 4 |
| 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych..... | 4 |
| 4. Osiągnięcie naukowe (omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy) ... | 4 |
| 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego:..... | 4 |
| 4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego..... | 5 |
| 4.3. Omówienie osiągnięcia naukowego | 7 |
| 4.1. Intensyfikacja wymiany ciepła w systemach chłodzenia strugą syntetyczną..... | 10 |
| 4.2. Innowacyjne metody badawcze charakterystyk przepływowych strugi syntetycznej..... | 19 |
| 5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej w szczególności zagranicznej..... | 25 |
| 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę..... | 26 |

1. Imię i Nazwisko: Paweł Gil

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:

- ✓ Dr nauk technicznych, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, dyscyplina: Budowa i Eksploatacja Maszyn.
Temat pracy doktorskiej: *Wpływ parametrów geometrycznych generatora strugi syntetycznej na efektywność chłodzenia w aspekcie zastosowań w urządzeniach technicznych*, 2017 r.
Promotor: dr hab. inż. Piotr Strzelczyk, prof. PRz
- ✓ Mgr inż.: Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, specjalność: Alternatywne Źródła i Przetwarzanie Energii.
Temat pracy: *Projekt i wykonanie stanowiska dydaktycznego do badania obiegów absorpcyjnych*, 2013 r.
Promotor: dr inż. Mariusz Szewczyk
- ✓ Inż.: Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, specjalność: Alternatywne Źródła i Przetwarzanie Energii.
Temat pracy: *Projekt techniczny małego układu kogeneracyjnego*, 2012 r.
Promotor: dr inż. Robert Smusz
- ✓ IWE - International Welding Engineer, 41 kurs Międzynarodowego Inżyniera Spawalnika, Instytut Spawalnictwa w Gliwicach. Uprawnienia PL/IWE/1834/2015, 2015 r.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2013-2018 – asystent, Katedra Termodynamiki i Mechaniki Płynów, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

2018- obecnie – adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych, Zakład Termodynamiki, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska.

4. Osiągnięcie naukowe (omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Na przedstawiony jako osiągnięcie mające istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna wybrano cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych pt.:

„Badania eksperymentalne generatorów strugi syntetycznej”

składający się z 15 artykułów naukowych z listy JCR (Journal Citation Report). Ich łączna liczba punktów wynosi 1545 pkt, a sumaryczny IF zgodny z rokiem opublikowania wynosi 50,093.

4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

- [A1] **Gil P.:** Flow and heat transfer characteristics of single and multiple synthetic jets impingement cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 201(2) (2023) 123590. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123590. ELSEVIER.
IF 5.431, MNiSW 200pkt
- [A2] **Gil P.:** Experimental investigation on heat transfer enhancement of air-cooled heat sink using multiple synthetic jets. *International Journal of Thermal Sciences*, 166 (2021) 106949. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.106949. ELSEVIER.
IF 4.779, MNiSW 140pkt
- [A3] **Gil P.:** Synthetic jet Reynolds number based on reaction force measurement. *Journal of Fluids and Structures*, 81 (2018) s. 466-478. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.05.011. ELSEVIER.
IF 3.070, Lista A z 2017 40pkt (wg aktualnej listy MNiSW 140pkt)
- [A4] **Gil P.:** Bluff body drag control using synthetic jet. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 12(1) (2019) s. 293-302. DOI: 10.29252/jafm.75.253.28960. JAFM.
IF 0.689, MNiSW 70pkt
- [A5] **Gil P., Wilk J., Smusz R., Gałek R.:** Centerline heat transfer coefficient distributions of synthetic jets impingement cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 160 (2020) 120147. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120147. ELSEVIER.
IF 5.584, MNiSW 200pkt
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu pomysłu modeli badawczych, opracowaniu metodologii, wykonaniu pomiarów eksperymentalnych, analizie i walidacji danych, pisaniu pierwszej wersji manuskryptu, redakcji i recenzji tekstu. Mój udział procentowy wynosi 50%.
- [A6] **Gil P., Wilk J.:** Heat transfer coefficients during the impingement cooling with the use of synthetic jet. *International Journal of Thermal Sciences*, 147 (2020) 106132. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106132. ELSEVIER.
IF 3.744, MNiSW 140pkt
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu pomysłu modeli badawczych, opracowaniu metodologii, wykonaniu pomiarów eksperymentalnych, analizie i walidacji danych, redakcji i recenzji tekstu.
Mój udział procentowy wynosi 50%.
- [A7] **Gil P., Smyk E., Gałek R., Przeszlowski Ł.:** Thermal, flow and acoustic characteristics of the heat sink integrated inside the synthetic jet actuator cavity. *International Journal of Thermal Sciences*, 170 (2021) 107171. DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2021.107171. ELSEVIER.
IF 4.779, MNiSW 140 pkt
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu pomysłu nowatorskiego urządzenia do chłodzenia, opracowaniu metodologii badań, budowie stanowiska badawczego, wykonaniu modeli, wykonaniu pomiarów cieplnych i przepływowych, analizie danych, pisanie pierwszej wersji manuskryptu, redakcji i recenzji tekstu.
Mój udział procentowy wynosi 40%.

- [A8] **Gil P.**, Wilk J., Smolen S., Gałek R., Markowicz M., Kucharski P.: Experimental Investigations of the LED Lamp with Heat Sink Inside the Synthetic Jet Actuator. *Energies*, 15(24) (2022) 9402. DOI: 10.3390/en15249402. MDPI.
IF 3.252, MNiSW 140pkt
Mój wkład w powstanie pracy polegał na zaplanowaniu eksperymentu, wykonaniu części modeli, zaplanowaniu i wykonaniu badań eksperymentalnych, obróbce danych pomiarowych, pisaniu części pracy.
Mój udział procentowy wynosi 30%.
- [A9] **Gil P.**, Strzelczyk P.: Performance and efficiency of loudspeaker driven synthetic jet actuator. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 76 (2016) s. 163–174.
DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.03.020. ELSEVIER.
IF 2.830, Lista A z 2017: 35 pkt (wg aktualnej listy MNiSW 140pkt)
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu pomysłu modeli badawczych, opracowaniu metodologii, wykonaniu pomiarów eksperymentalnych, analizie i walidacji danych, pisaniu pierwszej wersji manuskryptu, redakcji i recenzji tekstu.
Mój udział procentowy wynosi 50%.
- [A10] **Gil P.**, Smyk E.: Synthetic jet actuator efficiency based on the reaction force measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 295 (2019) s. 405-413.
DOI: 10.1016/j.sna.2019.06.011. ELSEVIER.
IF 2.904, MNiSW 100pkt
Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu pomysłu modeli badawczych, opracowaniu metodologii, wykonaniu pomiarów eksperymentalnych, analizie i walidacji danych, pisaniu pierwszej wersji manuskryptu, redakcji i recenzji tekstu.
Mój udział procentowy wynosi 50%.
- [A11] Smyk E., **Gil P.**, Dančová P., Jopek M.: The PIV measurements of time-averaged parameters of the synthetic jet for different orifice shapes. *Applied Sciences*, 13 (2023) 328. DOI: 10.3390/app13010328. MDPI.
IF 2.838, MNiSW 100pkt
Mój wkład w powstanie pracy polegał na zaplanowaniu eksperymentu, wykonaniu modeli badawczych, wykonaniu badań eksperymentalnych, obróbki danych pomiarowych, pisaniu części pracy.
Mój udział procentowy wynosi 40%.
- [A12] Smyk E., **Gil P.**, Gałek R., Przeszlowski Ł.: Comparison of the Axial Fan and Synthetic Jet Cooling Systems. *Applied Sciences*, 12 (2022) 4349. DOI: 10.3390/app12094349. MDPI.
IF 2.838, MNiSW 100pkt
Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu modeli badawczych, budowie stanowiska pomiarowego, opracowaniu metodologii, wykonaniu pomiarów, analizie danych, tworzeniu oprawy graficznej.
Mój udział procentowy wynosi 25%.
- [A13] **Gil P.**, Wilk J., Korzeniowski M.: Helmholtz Resonance Frequency of the Synthetic Jet Actuator. *Applied Sciences*, 11(12) (2021) 5666. DOI: 10.3390/app11125666. MDPI.
IF 2.838, MNiSW 100pkt
Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu modeli badawczych, opracowaniu

metodologii, wykonaniu pomiarów, analizie danych, redakcji tekstu.
Mój udział procentowy wynosi 33.34%.

[A14] **Gil P.**, Wilk, J.: Experimental Investigations of Different Loudspeakers Applied as Synthetic Jet Actuators. *Actuators*, 10(9) (2021) 224. DOI: 10.3390/act10090224. MDPI.

IF 2.523, MNiSW 20pkt

Mój wkład w powstanie pracy polegał na wykonaniu modeli badawczych, opracowaniu metodologii, wykonaniu pomiarów, analizie danych.

Mój udział procentowy wynosi 50%.

[A15] Smyk E., **Gil P.**, Gałek R., Przeszlowski Ł.: Acoustic and Flow Aspects of Novel Synthetic Jet Actuator, *Actuators*, 9(4) (2020) 100. DOI: doi:10.3390/act9040100. MDPI.

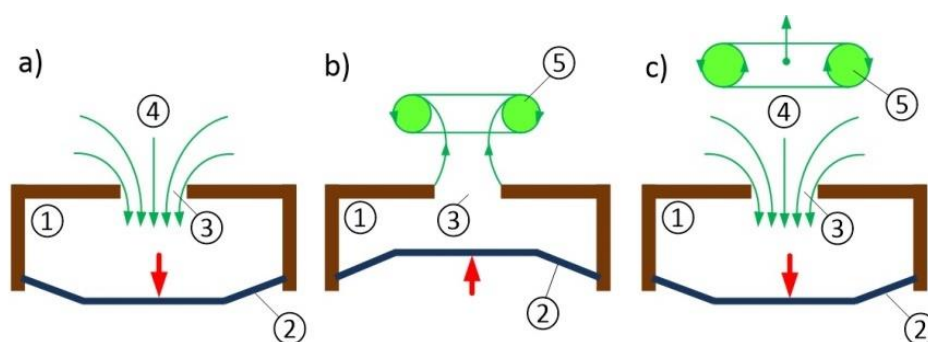
IF 1.994, MNiSW 20 pkt

Mój wkład w powstanie pracy polegał na opracowaniu pomysłu modeli badawczych, opracowaniu metodologii, wykonaniu pomiarów eksperymentalnych, analizie i walidacji danych, pisaniu pierwszej wersji manuskryptu, redakcji i recenzji tekstu. Mój udział procentowy wynosi 35%.

4.3. Omówienie osiągnięcia naukowego

W ramach przedstawionego do oceny osiągnięcia naukowego przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych różnych konfiguracji generatorów strugi syntetycznej.

Generator strugi syntetycznej jest urządzeniem umożliwiającym wytwarzanie nowego rodzaju przepływu nazywanego strugą syntetyczną (ang. synthetic jet). Struga syntetyczna jest to ciąg struktur wirowych, który w pewnej odległości od wylotu dyszy traci spójność tworząc przepływ turbulentny. Cechą charakterystyczną urządzenia wytwarzającego strugę syntetyczną jest brak zewnętrznego doprowadzenia płynu. Średni w czasie wydatek masowy w przekroju poprzecznym dyszy wynosi zero, ponieważ płyn roboczy jest cyklicznie zasysany i wytłaczany przez dyszę.

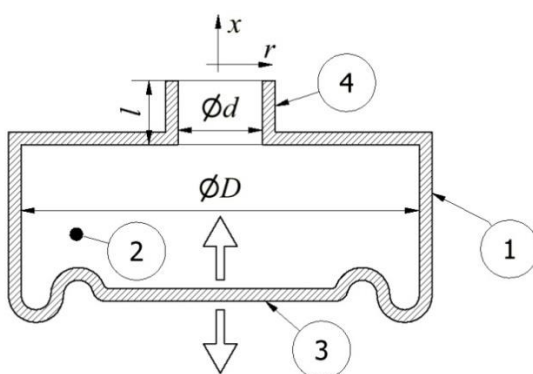


Rys. 1. Powstawanie strugi syntetycznej: a) zasysanie płynu do komory, b) wypychanie płynu z komory, tworzenie wiru pierścieniowego, c) zasysanie płynu do komory - wir jest nienaruszony przez zasysany płyn: 1 - komora, 2 - membrana, 3 - dysza, 4 - zasysany płyn, 5 - wir pierścieniowy

Struga syntetyczna powstaje na skutek cyklicznego ruchu tłoka lub membrany wewnątrz komory, która ma jedną lub wiele dysz w ścianie. Pierwszym etapem podczas generowania struktury wirowej jest cykl zasysania płynu do komory generatora (rys. 1a). Gdy membrana 2 porusza się do góry wystarczająco zmniejszając objętość komory 1, wypycha płyn przez dyszę 3 (rys. 1b). Powoduje to

oderwanie przepływu na krawędzi dyszy 3, a w konsekwencji, powstanie struktury wirowej 5, która za sprawą samoindukcji zaczyna się przemieszczać. Gdy membrana 2 poruszając się do dołu (rys. 1c) zasysa płyn 4 przez dyszę 3 do komory 1, struktura wirowa 5 znajduje się wystarczająco daleko od dyszy 3, zatem nie zostanie naruszona przez zasysany do komory płyn. Podczas jednego cyklu pracy generatora strugi syntetycznej składającego się z cyklu zasysania i wytłaczania płynu, powstaje jedna struktura wirowa. W czasie cyklicznego ruchu membrany powstaje ciąg struktur wirowych, dla dysz osiowoosymetrycznych powstają pierścienie wirowe.

Uproszczony schemat generatora strugi syntetycznej przedstawiono na rys. 2. Wymuszenie przepływu przez dyszę może być spowodowane za pomocą tłoka, przetworników piezoelektrycznych lub przetworników elektroakustycznych (głośniki).



Rys. 2. Schemat generatora strugi syntetycznej: 1 – obudowa, 2 – komora, 3 – drgająca membrana, 4 – dysza. d – średnica dyszy, D – średnica komory, l – długość dyszy, x , r – współrzędna osiowa i promieniowa

Struga syntetyczna jest rodzajem przepływu, który ze względu na swoją strukturę wirową, jest zmienny w czasie i przestrzeni. W pobliżu dyszy wektory prędkości okresowo zmieniają kierunek o 180° , zmienia się wartość prędkości od maksymalnej, przechodząc przez zero, do wartości minimalnej w każdym punkcie. Zmienność wartości i kierunku wektorów prędkości jest dużym wyzwaniem w pomiarach eksperymentalnych pól prędkości, a w szczególności pomiarów prędkości charakterystycznej wykorzystywanej do określenia liczb bezwymiarowych opisujących przepływ.

Struga syntetyczna zaliczana jest do przepływów pulsacyjnych, dlatego opisują ją dwie liczby bezwymiarowe: Reynoldsa i Strouhala:

$$Re = \frac{U_e \cdot d}{\nu}, \quad (1)$$

$$Sr = \frac{2\pi f d}{U_e}, \quad (2)$$

gdzie: d – średnica dyszy, f – częstotliwość drgań membrany, ν – lepkość kinematyczna płynu.

Występująca w zależnościach (1) i (2) prędkość U_e jest prędkością charakterystyczną płynu liczoną jako całka po czasie w cyklu wypychania płynu roboczego z komory generatora strugi syntetycznej oraz jako całka po polu powierzchni dyszy:

$$U_e = \frac{2}{TA} \int_A \int_0^{\frac{T}{2}} (u) d\tau dA \quad (3)$$

gdzie: $T=1/f$ – okres drgań, A – pole powierzchni dyszy, u – prędkość chwilowa, τ – czas.

W literaturze, w opisie strugi syntetycznej, częściej stosowana jest odwrotność liczby Strouhala, nazwana bezwymiarową długością skoku (ang. dimensionless stroke length), która reprezentuje odległość, na jaką cząstki płynu przemieszczają się od dyszy podczas jednego cyklu pracy $T=1/f$:

$$L_0 = \frac{\pi}{Sr}. \quad (4)$$

Ze względu na periodyczny charakter strugi syntetycznej wykorzystuje się dodatkowo do jej opisu liczbę Stokesa:

$$Stk = \sqrt{\frac{2\pi f d^2}{\nu}}. \quad (5)$$

Zjawiska cieplne reprezentuje liczba Nusselta:

$$Nu = \frac{h \cdot d}{\lambda} \quad (6)$$

lub liczba Nusselta punktu stagnacji:

$$Nu_0 = \frac{h_0 \cdot d}{\lambda} \Big|_{r=0}. \quad (7)$$

Współczynnik przejmowania ciepła jest określany z zależności:

$$h = \frac{q}{(T_w - T_\infty)} - h_r, \quad (8)$$

gdzie: T_w – temperatura ścianki, T_∞ – temperatura płynu w obszarze niezaburzonym, h_r – radiacyjny współczynnik przejmowania ciepła, λ – współczynnik przewodzenia ciepła płynu, r – współrzędna promieniowa (rys. 2).

Zagadnienia związane ze strugą syntetyczną, jej powstawaniem, właściwościami, możliwościami aplikacyjnymi, a także z urządzeniami umożliwiającymi jej wytworzenie – generatorami strugi syntetycznej – to nowa tematyka badawcza, której początek rozwoju przypada na pierwsze lata XXI wieku. Sam mechanizm powstawania ciągu struktur wirowych bez zewnętrznego doprowadzenia płynu jest obserwowany w przyrodzie – wiele odmian głowonogów stosuje tę metodę do przemieszczania się – wykorzystywana jest siła odrzutu. Podpatrzenie natury przyczyniło się do

rozwoju nowego obszaru badawczego ukierunkowanego na możliwości aplikacyjne strugi syntetycznej.

Zjawiska towarzyszące powstawaniu strugi syntetycznej, procesy zachodzące w generatorach strugi, a w konsekwencji również same zastosowania techniczne kwalifikują rozważany obszar badawczy jako zakres inżynierii mechanicznej. Struga syntetyczna może być wykorzystywana do redukcji oporów aerodynamicznych, kontroli warstwy przyściennej lub napędu małych podwodnych robotów. Najbardziej perspektywicznym zastosowaniem strugi syntetycznej jest rozpraszanie ciepła, zarówno przy chłodzeniu uderzeniowym jak i w połączeniu z przepływem poprzecznym, w szczególności z przepływami laminarnymi.

Tematyka zaprezentowana w przedstawionym do oceny osiągnięciu naukowym stanowi rozwinięcie prowadzonych dotychczas w świecie prac badawczych, a także pokazuje własne, oryginalne rozwiązania dotyczące konstrukcji, metod badawczych, możliwości aplikacyjnych, optymalizacji, zakresów stosowalności różnych typów generatorów strugi syntetycznej.

Obszar badawczy zawarty w tematycznym cyklu publikacji zatytułowanym: „Badania eksperymentalne generatorów strugi syntetycznej” został podzielony na dwa główne podtematy:

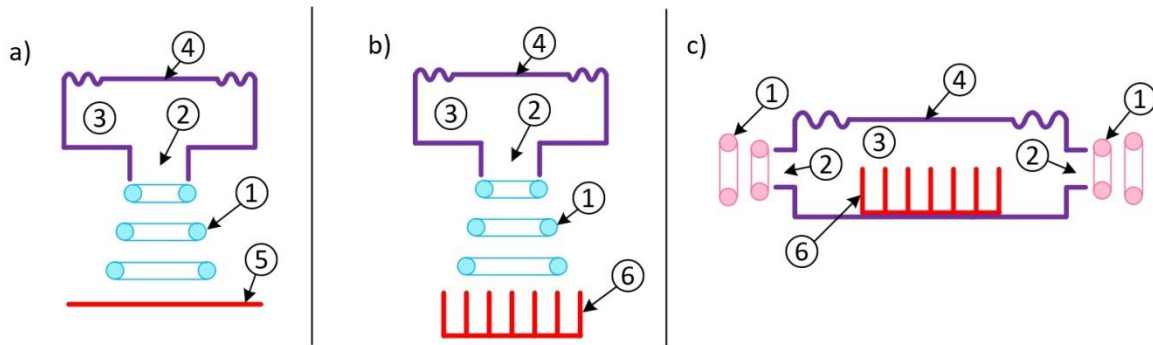
- ✓ „Intensyfikacja wymiany ciepła w systemach chłodzenia strugą syntetyczną”
- ✓ „Innowacyjne metody badawcze charakterystyk przepływowych strugi syntetycznej”.

4.1. Intensyfikacja wymiany ciepła w systemach chłodzenia strugą syntetyczną

Procesy prowadzące do zwiększenia intensywności wymiany ciepła w różnych zagadnieniach technicznych mogą być realizowane na wiele sposobów. Jedną z innowacyjnych metod znajdujących zastosowanie w konstruowanych systemach chłodzenia, powodującą wzrost współczynników przejmowania ciepła, jest metoda chłodzenia z wykorzystaniem strugi syntetycznej.

W ramach realizowanych prac przeprowadzono szereg eksperymentów mających na celu zbadanie wpływu określonych parametrów, zarówno geometrycznych, jak i elektrycznych oraz akustycznych, charakteryzujących generatory strugi syntetycznej, na intensyfikację procesów wymiany ciepła.

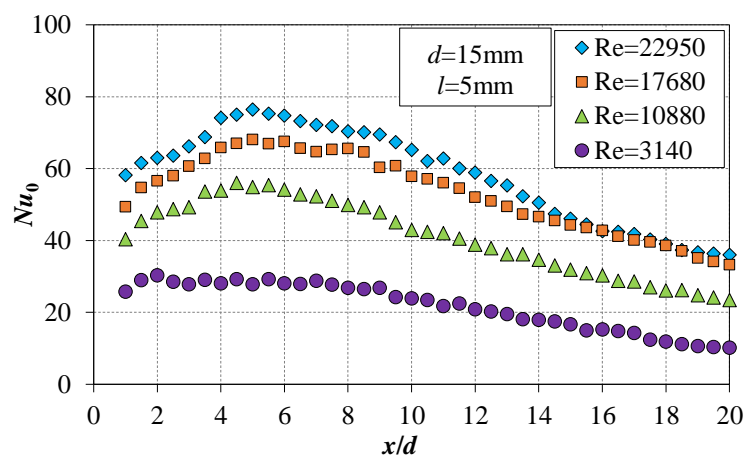
Możliwe do realizacji, różne konfiguracje systemów, w których następuje intensyfikacja konwekcyjnych współczynników przejmowania ciepła podczas chłodzenia strugą syntetyczną, zaprezentowano schematycznie na rysunku 3.



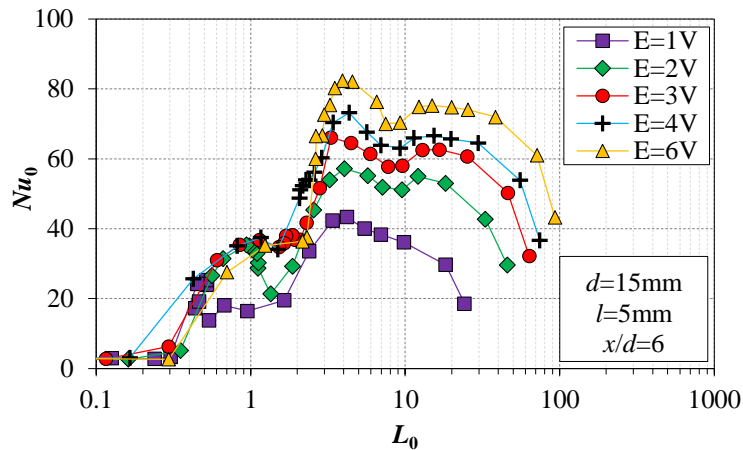
Rys. 3. Różne konfiguracje systemów chłodzenia strugą syntetyczną: a) chłodzenie uderzeniowe płyty, b) chłodzenie uderzeniowe radiatora, c) radiator umieszczony w komorze generatora strugi syntetycznej. 1 – struga syntetyczna, 2 – dysza, 3 – komora, 4 – przetwornik elektroakustyczny, 5 – chłodzona powierzchnia, 6 – chłodzony radiator

Wyniki badań chłodzenia uderzeniowego strugą syntetyczną w gorącą płytę są zamieszczone w publikacjach [A1], [A5] oraz [A6], natomiast rezultaty badań chłodzenia radiatora zintegrowanego w komorze generatora strugi syntetycznej zaprezentowano w [A2], [A7] oraz [A12].

Praca [A6] zawiera wyniki badań eksperymentalnych współczynników przejmowania ciepła przy chłodzeniu uderzeniowym strugą syntetyczną z pojedynczej osiowosymetrycznej dyszy dla różnych średnic dyszy, długości dyszy, objętości komory oraz zmiennych częstotliwości i napięcia zasilania generatora strugi syntetycznej. Zmieniane również były odległości pomiędzy dyszą a powierzchnią chłodzoną. Konwekcyjne współczynniki przejmowania ciepła w punkcie stagnacji podczas chłodzenia strugą syntetyczną osiągały maksymalną wartość wynoszącą $h_0 = 144 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, natomiast przy wyłączonym generatorze strugi w warunkach konwekcji swobodnej współczynniki przejmowania ciepła były w zakresie $5\text{-}6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.



Rys. 4. Liczba Nusselta w punkcie stagnacji przy uderzeniowym chłodzeniu strugą syntetyczną w funkcji bezwymiarowej odległości pomiędzy dyszą a powierzchnią chłodzoną x/d dla różnych liczb Reynoldsa



Rys. 5. Liczba Nusselta w punkcie stagnacji przy uderzeniowym chłodzeniu strugą syntetyczną w funkcji bezwymiarowej długości skoku dla różnych napięć zasilania E generatora strugi syntetycznej

Najwyższe wartości współczynników przejmowania ciepła obserwowano dla częstotliwości rezonansowej głośnika oraz częstotliwości rezonansowej Helmholtza, dla których występują najwyższe wartości liczby Reynoldsa [A9]. Dla określonych liczb Reynoldsa najwyższe wartości współczynników przejmowania ciepła osiągnęto przy bezwymiarowej odległości osiowej w zakresie $4 < x/d < 6$ (rys. 4). Wpływ bezwymiarowej liczby skoku na liczbę Nusselta zaprezentowano na rys. 5.

Na podstawie wyników pomiarów zostały opracowane korelacje opisujące liczbę Nusselta w funkcji liczb bezwymiarowych:

$$Nu_0 = Nu_0 \left(Re, L_0, Pr, \frac{x}{d} \right) \quad (9)$$

$$Nu_0 = 0,1336 \cdot Re^{0,59} \cdot L_0^{0,33} \cdot \left(\frac{x}{d} \right)^{0,55} \cdot \exp \left(-0,145 \cdot \frac{x}{d} \right) \quad (10)$$

dla $L_0=0,82 \div 4,71$, $x/d=1 \div 20$, $Re=4900 \div 23000$, $Pr=0,705$

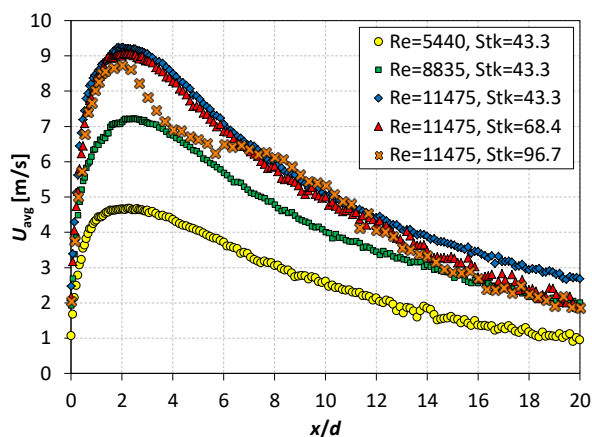
oraz

$$Nu_0 = 0,084 \cdot Re^{0,669} \cdot L_0^{-0,1} \cdot \left(\frac{x}{d} \right)^{0,611} \cdot \exp \left(-0,11 \cdot \frac{x}{d} \right) \quad (11)$$

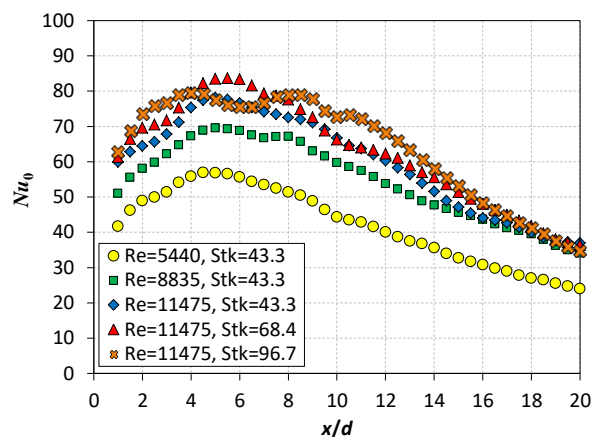
dla $L_0=4,71 \div 170,59$, $x/d=1 \div 20$, $Re=3600 \div 23000$, $Pr=0,705$.

W publikacji [A5] zaprezentowano wyniki badań cieplnych oraz przepływowych przy chłodzeniu uderzeniowym strugą syntetyczną dla różnych liczb Reynoldsa, Strouhala, Stokesa oraz bezwymiarowej odległości osiowej (x/d). Struga syntetyczna osiąga najwyższe wartości prędkości uśrednionej w czasie w odległości osiowej od dyszy wynoszącej w przybliżeniu $x/d=2$ (rys. 6),

natomiast współczynniki przejmowania ciepła przy chłodzeniu osiągają najwyższe wartości dla zakresu $4 < x/d < 6$ (rys. 7).



Rys. 6. Prędkość średnia w czasie strugi syntetycznej w osi dyszy



Rys. 7. Liczba Nusselta w punkcie stagnacji

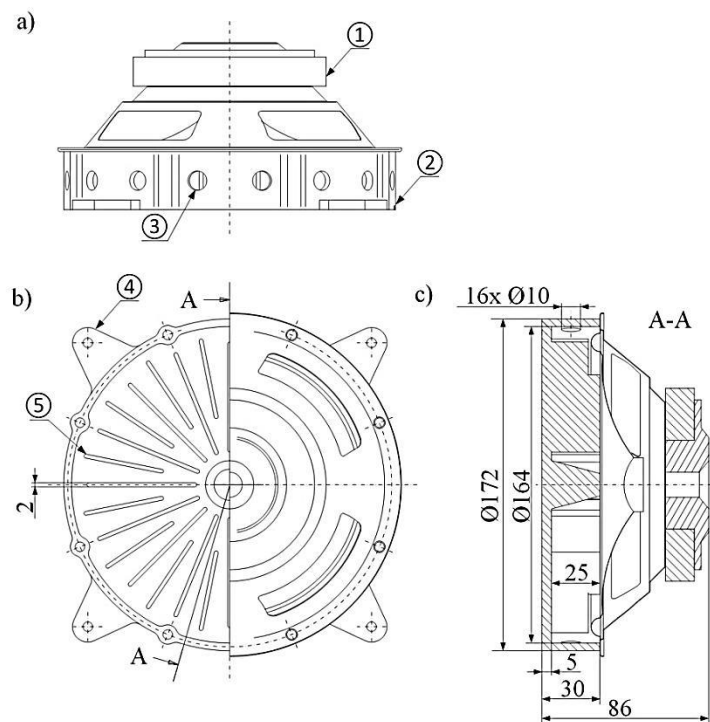
Obniżone wartości współczynników przejmowania ciepła dla małych odległości czoła dyszy od powierzchni chłodzonej (w zakresie od $0 < x/d < 6$ rys. 7), jest spowodowane zasysaniem ciepłego powietrza przez generator strugi syntetycznej i tym samym redukcji rozpraszanego strumienia ciepła. Redukując moc cieplną dostarczaną do grzałki, rozkład osiowy współczynników przejmowania ciepła zmienia się i wartość maksymalna współczynników przejmowania ciepła przesuwa się do $x/d=2$.

Porównanie charakterystyk cieplnych i przepływowych generatora strugi syntetycznej z jedną dyszą w stosunku do generatorów z wieloma dyszami to tematyka zawarta w pracy [A1]. Celem badań było sprawdzenie czy generatory z większą liczbą dysz cechują się lepszymi charakterystykami cieplnymi w stosunku do generatorów z jedną dyszą. Prezentowane dotychczas w światowej literaturze wyniki takich badań (przeгляд literatury w [A1]) pokazują korzystny wpływ zastosowania wielu dysz w stosunku do generatorów jednodyszowych. Okazuje się, że nie jest to jednoznaczne, badania opisane w pracy [A1] uwiaryściły inną specyfikę oddziaływania jednej bądź wielu dysz na charakterystyki generatora strugi syntetycznej. W pracy założono, że pole powierzchni dyszy w przypadku generatora z jedną dyszą oraz pole powierzchni wszystkich dysz w generatorze z wieloma dyszami będzie takie samo. Dla zachowania podobieństwa przepływu założono także równość liczb kryterialnych: liczby Reynoldsa oraz Strouhala. W tym celu zaproponowano metodę obliczania ekwiwalentnego wymiaru charakterystycznego oraz ekwiwalentnej prędkości charakterystycznej wyznaczonej z wydatku objętościowego uzyskiwanego w cyklu wypychania płynu ze wszystkich dysz. W ramach pracy zbadano sprawność energetyczną generatorów strugi syntetycznej, rozkłady ciśnień, prędkości przepływu oraz dokonano pomiaru współczynników przejmowania ciepła przy chłodzeniu uderzeniowym. Wyniki badań pokazały, że zachowując podobieństwo odpowiednich liczb bezwymiarowych uzyskuje się bardzo zbliżone charakterystyki

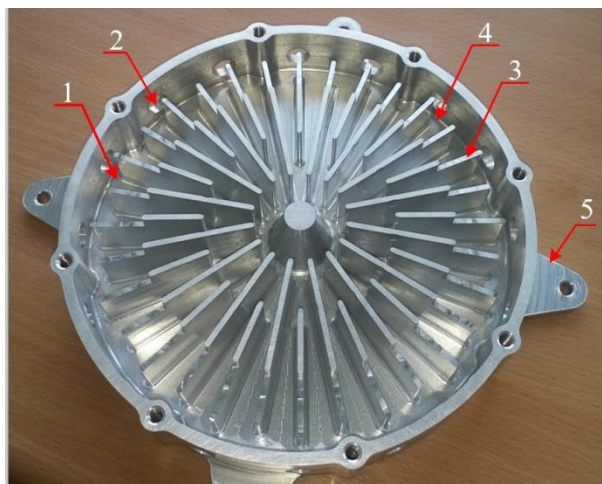
cieplne przy chłodzeniu uderzeniowym oraz zbliżoną sprawność energetyczną generatora strugi syntetycznej. Z badań wynika, że generatory strugi syntetycznej ze zwiększoną liczbą dysz osiągają gorsze charakterystyki cieplne oraz przepływowe w stosunku do generatorów jedno-dyszowych.

Ze względu na fakt, że podczas chłodzenia uderzeniowego strugą syntetyczną najwyższe współczynniki przejmowania ciepła występują w odległości $4 < x/d < 6$ pomiędzy wylotem dyszy a powierzchnią chłodzoną (rys. 7), wymiary urządzenia chłodzącego ulegają powiększeniu, przez co opisany system chłodzenia nie może zostać w praktyce wykorzystany w zastosowaniach technicznych, w szczególności w chłodzeniu elektroniki. Rozwiązaniem tego problemu jest umieszczenie elementu chłodzonego, np. radiatora, w komorze generatora strugi (rys. 3c). Rozwiązanie takie umożliwia znacząco redukcję gabarytów systemu chłodzącego, jednocześnie integrując radiator wraz z generatorem strugi syntetycznej. Opisane rozwiązanie konstrukcyjne jest przedmiotem patentu [K3].

W publikacji [A2] przedstawiono nową konfigurację systemu chłodzenia strugą syntetyczną ze zintegrowanym radiatorem radialnym w komorze generatora (rys. 8 i 9).



Rys. 8. Generator strugi syntetycznej ze zintegrowanym radiatorem w komorze: 1 – głośnik, 2 – radiator, 3 – dysze, 4 – uchwyty montażowe, 5 – żebra. Wymiary w mm.



Rys. 9. Komora generatora strugi syntetycznej ze zintegrowanym radiatorem radialnym: 1 – komora, 2 – dysze, 3 – żebra, 4 – kanał międzyżebrowy, 5 – uchwyt montażowy.

W ramach pracy opisanej w [A2] wykonano pomiary chwilowych prędkości w osi dyszy, oraz chwilowych temperatur powietrza podczas cyklu zasysania i wytłaczania płynu. Określono liczby Reynoldsa oraz bezwymiarową długość skoku L_0 , jak również wyznaczono rezystancję termiczną radiatora R . Z danych pomiarowych utworzono związki korelacyjne w postaci:

$$R = 258 \cdot Re^{-0,80} \cdot L_0^{-0,33} \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right] \quad (12)$$

dla: $L_0=1,34 \div 4,63$, $Re=792 \div 3117$, $Pr=0,705$,

oraz

$$R = 152 \cdot Re^{-0,78} \cdot L_0^{-0,05} \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right] \quad (13)$$

dla: $L_0=5,71 \div 21,95$, $Re=792 \div 3117$, $Pr=0,705$.

Badania przepływowe, cieplne oraz akustyczne jedenastu różnych konfiguracji dysz generatora strugi syntetycznej z wbudowanym radiatorem zostały opisane w publikacji [A7]. Zbadano wpływ liczby dysz oraz ich średnic, przy zasilaniu generatora strugi syntetycznej stałą mocą czynną, na sprawność energetyczną generatora, poziom ciśnienia akustycznego SPL, oraz rezystancję termiczną radiatora R . Wykorzystano modułowy generator strugi syntetycznej zaprezentowany na rys. 10.



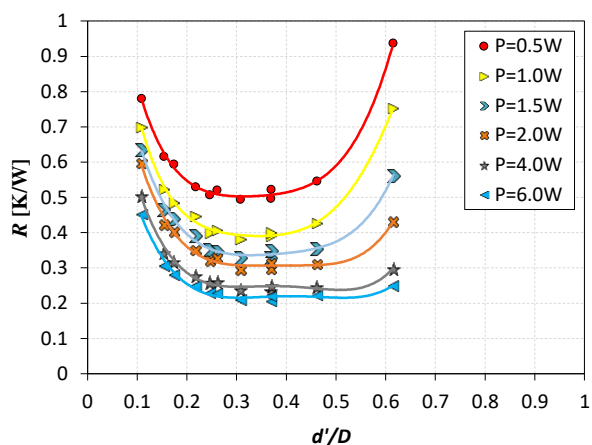
Rys. 10. Modułowy generator strugi syntetycznej ze zintegrowanym radiatorem w komorze

W pracy [A7] zaproponowano, aby charakterystyczny wymiar geometryczny czyli tzw. średnica ekwiwalentna d' , została określona z całkowitego pola powierzchni wszystkich dysz i podzielona przez średnicę efektywną głośnika, co stanowiło rozwinięcie koncepcji dotychczas stosowego wymiaru charakterystycznego w przypadku generatorów jednodyszowych i tym samym dało możliwość porównania ich charakterystyk:

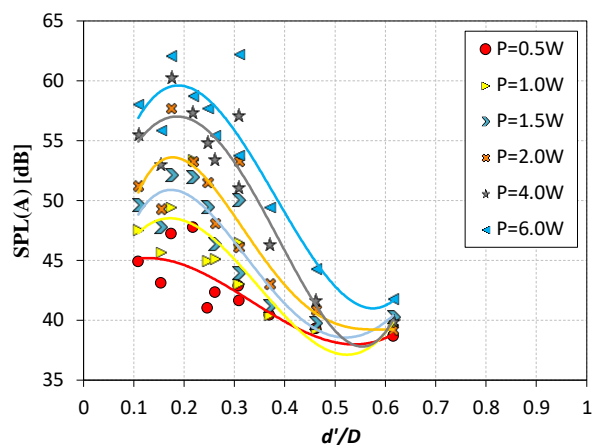
$$\frac{d'}{D} = \sqrt{n} \frac{d}{D} \quad (14)$$

gdzie: D – średnica efektywna głośnika, d – średnica dyszy, n – liczba dysz.

Charakterystyki reprezentujące rezystancję termiczną radiatora R oraz poziom ciśnienia akustycznego SPL przedstawiono na rysunkach 11 i 12. W zależności od tego co jest ważniejsze w rozpatrywanym systemie chłodzenia: wydajność czy cicha praca, można wytypować różne geometrie spełniające te kryteria. Najmniejsza rezystancja termiczna występuje dla geometrii $d'/D=0,31$, natomiast najniższy poziom ciśnienia akustycznego SPL dla geometrii $d'/D=0,62$.



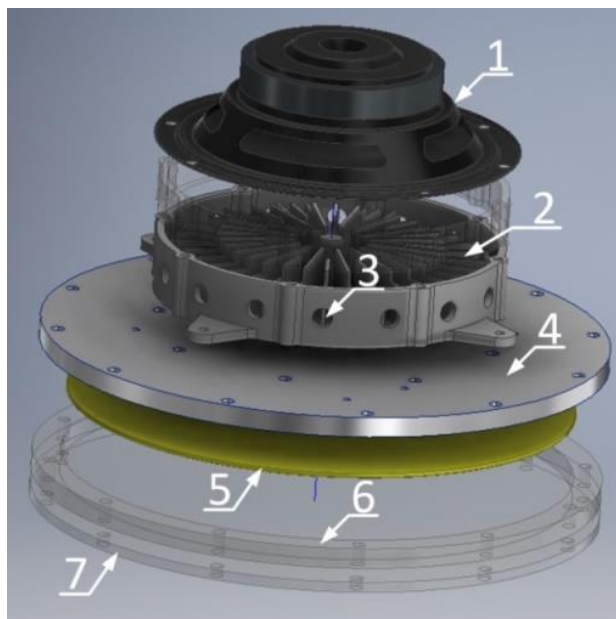
Rys. 11. Rezystancja termiczna radiatora dla różnych mocy zasilania generatora P , oraz różnych zredukowanych geometrii d'/D



Rys. 12. Poziom ciśnienia akustycznego dla różnych mocy zasilania generatora P , oraz różnych zredukowanych geometrii d'/D

W publikacji [A12] zaprezentowano porównanie dwóch systemów chłodzenia radiatorów. Pierwszy system wykorzystywał komercyjny wentylator osiowy, natomiast w drugim systemie zastosowano generator strugi syntetycznej. Obydwa urządzenia były zasilane taką samą mocą elektryczną i chłodziły ten sam radiator, który był zainstalowany na grzałce elektrycznej. Wyniki pomiarów ukazują, że porównanie różnych systemów chłodzenia jest skomplikowane i rezultaty są zależne od jakości wykorzystanego wentylatora osiowego. Istnieją porównania gdzie generator strugi syntetycznej osiąga porównywalne charakterystyki cieplne w stosunku do wentylatora osiowego (przegląd literatury w publikacji [A12]), jednakże tylko dlatego, że był to niskiej jakości wentylator, który miał niską sprawność energetyczną. W publikacji [A12] wytypowano do porównania jeden z lepszych komercyjnych wentylatorów osiowych, który dla tej samej mocy elektrycznej obniżał rezystancję termiczną radiatora aż o 42% w stosunku do chłodzenia generatorem strugi syntetycznej.

Prototyp przemysłowej oprawy oświetleniowej LED o mocy nominalnej 150W chłodzonej generatorem strugi syntetycznej ze zintegrowanym radiatorem (rys. 13) został opisany w publikacji [A8]. Zaprezentowano wyniki pomiarów elektrycznych oraz cieplnych oprawy oświetleniowej wraz z pełnym bilansem energetycznym oprawy LED. Oszacowano temperaturę złącza diody LED, a następnie dobrano moc systemu chłodzącego, który zapewniał pracę złącz diod LED w niskich temperaturach $< 51^{\circ}\text{C}$. Z pomiarów eksperymentalnych opraw oświetleniowych LED o efektywności 166 lm/W wynika, że w przybliżeniu 60% energii elektrycznej jest zamieniane na ciepło, natomiast 40% jest zamieniane na światło.



Rys. 13. Oprawa oświetleniowa LED chłodzona strugami syntetycznymi: 1 – głośnik, 2 – radiator w komorze, 3 – dysza, 4 – aluminiowa płyta przewodząca ciepło z płytki PCB, 5 – płytki PCB, 6 – uszczelka, 7 – klosz z plexi

Główne wnioski wynikające z analizy wyników badań charakterystyk cieplnych cechujących systemy chłodzenia z wykorzystaniem strugi syntetycznej są następujące:

- najwyższe wartości współczynników przejmowania ciepła występują przy częstotliwościach rezonansowej głośnika oraz rezonansowej Helmholtza, które to częstotliwości odpowiadają najwyższym wartościom liczb Reynoldsa charakterystycznym dla przepływów wywołanych przez generator strugi syntetycznej,
- proces zasysania przez generator strugi syntetycznej ciepłego powietrza z obszaru chłodzonego strugą powoduje obniżenie wartości współczynników przejmowania ciepła w pobliżu dyszy,
- liczba Nusselta charakterystyczna dla procesów chłodzenia strugą syntetyczną jest funkcją skorelowanych ze sobą następujących liczb bezwymiarowych: liczby Reynoldsa, Prandtla, Strouhala, Stokesa oraz bezwymiarowej odległości dyszy od powierzchni chłodzonej,
- dla zachowania warunków podobieństwa koniecznych przy badaniach modelowych systemów chłodzenia strugą syntetyczną, istotnym jest odpowiednie zdefiniowanie liczb bezwymiarowych poprzez wprowadzenie ekwiwalentnego wymiaru oraz prędkości charakterystycznej,
- konstrukcja generatora strugi syntetycznej, jego geometria, ilość zastosowanych dysz i ich konfiguracje, a także parametry elektryczne oraz akustyczne generatora stanowią zestaw czynników mających istotny wpływ na intensyfikację procesów chłodzenia z wykorzystaniem strugi syntetycznej.

4.2. Innowacyjne metody badawcze charakterystyk przepływowych strugi syntetycznej

Ze względu na specyfikę zagadnień związanych z powstawaniem i właściwościami strugi syntetycznej pojawia się konieczność prowadzenia badań mających na celu lepsze rozpoznanie zjawisk fizycznych towarzyszących tworzeniu się strugi, a także określenie charakterystyk przydatnych w zastosowaniach technicznych. Specyfika strugi syntetycznej wymaga niekiedy wykorzystania niekonwencjonalnego eksperymentu. W ramach realizowanych prac zostały przeprowadzone badania eksperymentalne charakterystyk przepływowych strugi syntetycznej z zastosowaniem innowacyjnych metod badawczych.

W publikacji [A9] zaprezentowano charakterystyki przepływowe generatora strugi syntetycznej dla różnych konfiguracji geometrycznych oraz różnych częstotliwości i mocy doprowadzanych do generatora. Ze względu na fakt, że średni wydatek masowy w przekroju dyszy generatora strugi wynosi zero, nie można wykorzystać definicji sprawności energetycznej stosowanej np. dla wentylatorów. Dlatego też zaproponowano następującą definicję sprawności energetycznej:

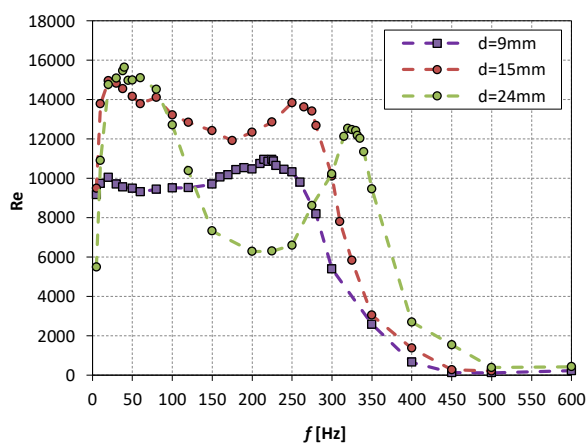
$$\eta_v = \frac{\rho \cdot A \cdot U_0^3}{2 \cdot P} \quad (15)$$

Prędkość w równaniu (15) została określona z zależności:

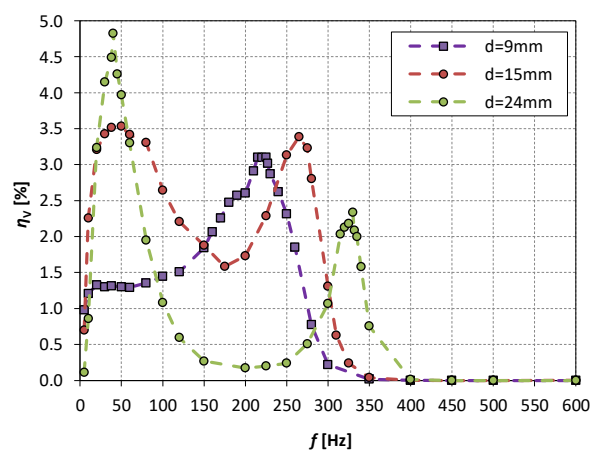
$$U_0 = \sqrt{\frac{1}{A} \frac{1}{T} \int_0^T \int_A (u^2) d\tau dA}, \quad (16)$$

gdzie P - moc dostarczana do generatora strugi syntetycznej.

Prędkości zostały zmierzone za pomocą anemometru stałotemperaturowego. W artykule zaprezentowano charakterystyki określające zależność liczb Reynoldsa oraz sprawności energetycznej w funkcji częstotliwości dla różnych średnic dysz, długości dysz oraz objętości komory generatora. Przykładowe wyniki zaprezentowano na rysunkach 14 i 15.



Rys. 14. Liczba Reynoldsa strugi syntetycznej w funkcji częstotliwości drgań głośnika dla trzech różnych średnic dysz.



Rys. 15. Sprawność energetyczna generatora strugi syntetycznej w funkcji częstotliwości drgań głośnika dla trzech różnych średnic dysz.

Generator strugi syntetycznej osiąga najwyższe wartości liczby Reynoldsa oraz sprawności energetycznej przy dwóch częstotliwościach rezonansowych: częstotliwości rezonansowej głośnika oraz częstotliwości rezonansowej Helmholtza. Częstotliwość rezonansowa głośnika jest stała i zależna od zastosowanego przetwornika, natomiast częstotliwość rezonansowa Helmholtza jest zależna od objętości komory oraz średnicy i długości dyszy.

Określenie prędkości charakterystycznej do obliczenia liczby Reynoldsa i Strouhala (równanie 3) oraz do obliczenia sprawności generatora strugi syntetycznej (równanie 16) wymaga całkowania prędkości po czasie i po polu powierzchni dyszy. W szczególności równanie 3 sprawia trudności, ponieważ całkowanie po czasie odbywa się w połowie cyklu pracy generatora strugi syntetycznej. Dla pomiarów anemometrem, które umożliwiają uzyskanie tylko modułu prędkości, stosuje się specjalną procedurę umożliwiającą uzyskanie informacji o kierunku (znaku) prędkości, po czym można zastosować całkowanie określone w równaniu 3. Skomplikowany i czasochłonny charakter pomiarów prędkości charakterystycznych anemometrem skłonił do poszukiwania innym metod badawczych, umożliwiających uproszczenie procedury badawczej. W publikacji [A3] została zaprezentowana nowa metoda pomiaru prędkości charakterystycznej strugi syntetycznej, na podstawie której określa się liczbę Reynoldsa i Strouhala. Zaobserwowano związek pomiędzy siłą odrzutu generatora strugi syntetycznej, a jej prędkością charakterystyczną. Siła odrzutu uśredniona w czasie może zostać w prosty sposób określona z pomiarów masy na wadze laboratoryjnej, natomiast prędkość charakterystyczna strugi była mierzona za pomocą anemometru stałotemperaturowego zainstalowanego na manipulatorze, który przemieszczał sondę po współrzędnej promieniowej r dyszy (rys. 2).

Zaproponowano zależność wiążącą siłę odrzutu generatora strugi syntetycznej z jej prędkością charakterystyczną (równanie 3) w postaci:

$$U_e = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{mg}{\rho A}} \quad (17)$$

gdzie: m – masa zarejestrowana na wadze, g – przyspieszenie grawitacyjne, A – pole powierzchni dyszy, ρ – gęstość płynu roboczego.

Wykonano pomiary w 293 punktach, dla różnych konfiguracji geometrycznych generatora strugi oraz w szerokim zakresie liczb Reynoldsa i Strouhala. Uzyskano dużą zbieżność wyników pomiarów z zaproponowanym modelem. Nowa metoda badawcza umożliwia około 10-krotne skrócenie czasu pomiaru prędkości charakterystycznej w stosunku do pomiarów anemometrem. Dodatkowo, nowa metoda badawcza obniża znacząco nakład inwestycyjny na aparaturę pomiarową, ponieważ do pomiaru masy wystarcza standardowa waga laboratoryjna z rozdzielczością pomiaru masy wynoszącą 0,01g. W standardowych badaniach anemometrycznych wymagany jest mostek anemometru wraz z sondami, kalibratorem oraz manipulatorem niezbędnym do przemieszczania sondy.

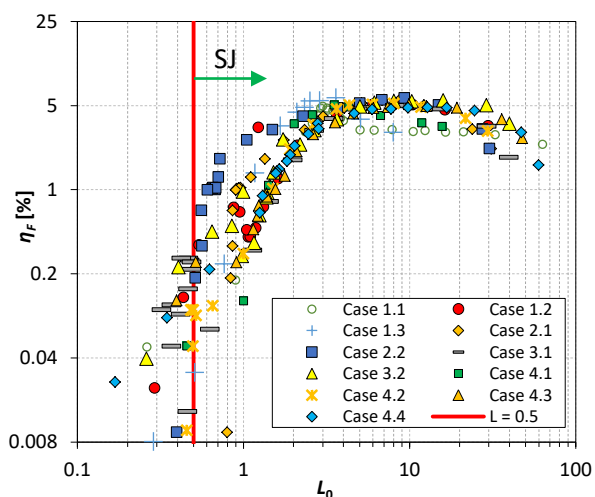
W publikacji [A10] rozwinięto metodę opracowaną w [A3] umożliwiającą szybki pomiar sprawności energetycznej generatora strugi syntetycznej na podstawie badań siły odrzutu. Nowa metoda pomiarowa umożliwia znaczące skrócenie czasu pomiaru sprawności, tym samym umożliwiając pomiary dla szerokiego zakresu konfiguracji geometrycznych, w stosunku do pomiarów prowadzonych za pomocą anemometru stałotemperaturowego (równania 15 i 16).

Została zaproponowana nowa zależność na określenie sprawności energetycznej generatora strugi syntetycznej w postaci:

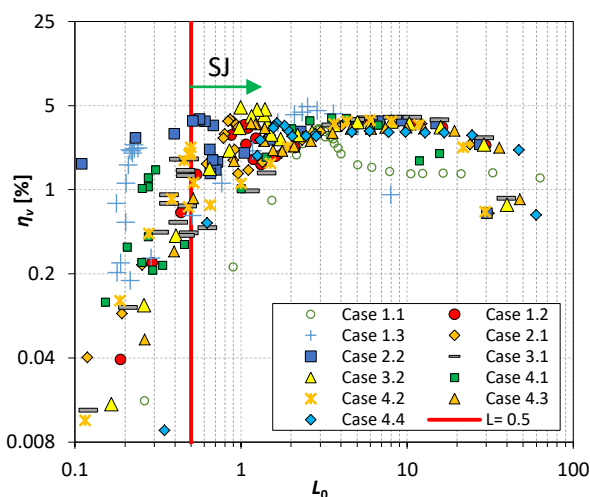
$$\eta_F = \frac{1}{2P} \sqrt{\frac{(mg)^3}{\rho A}} \quad (18)$$

gdzie: P – moc czynna dostarczana do generatora strugi syntetycznej.

Porównano dwie metody określania sprawności generatorów strugi syntetycznej: opartą na pomiarze prędkości η_v , oraz na pomiarze siły odrzutu η_F . Wyniki porównania zaprezentowano na rysunkach 16 i 17. Dla bezwymiarowej długości skoku w zakresie $3 < L_0 < 100$ obydwie metody dają podobne rezultaty, natomiast metoda pomiaru sprawności bazująca na pomiarach prędkości η_v umożliwia uzyskanie sprawności dodatniej dla obszarów gdzie struga syntetyczna nie występuje ($L_0 < 0,5$). Jest to największa wada tej metody, która utrudnia interpretację wyników. Dla $L_0 < 0,5$ struga syntetyczna nie powstaje, ponieważ prędkości płynu są zbyt małe aby utworzyć strukturę wirową, dlatego też siła odrzutu wynosi zero i sprawność η_F wynosi zero (równanie 18), natomiast występują wówczas mierzalne oscylacje prędkości płynu w dyszy, które zarejestrowane anemometrem i podstawione do równania 16 i 15 skutkują dodatnią wartością sprawności energetycznej generatora (rys. 17 dla $L_0 < 0,5$).

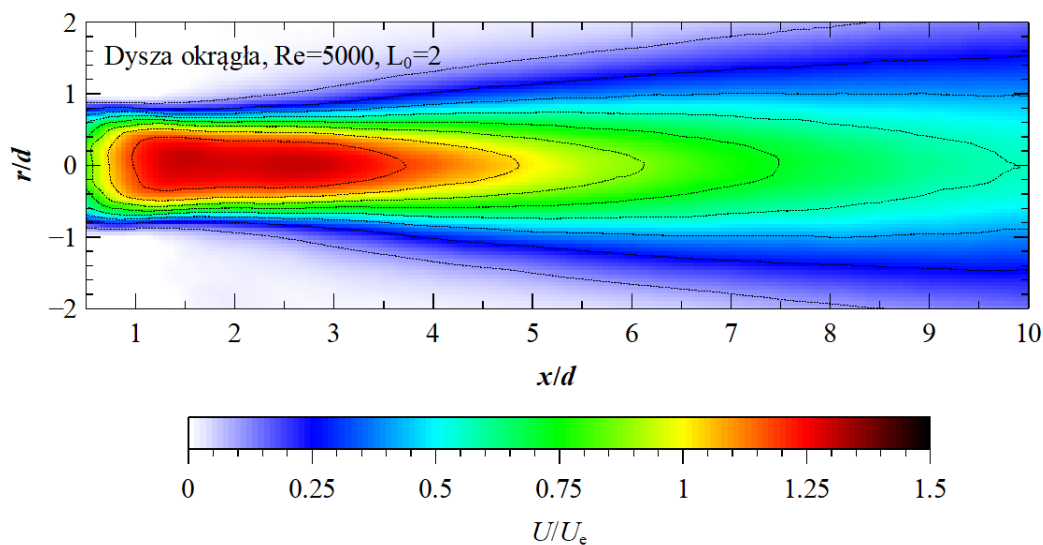


Rys. 16. Sprawność energetyczna generator strugi syntetycznej określona z siły odrzutu w funkcji bezwymiarowej długości skoku.



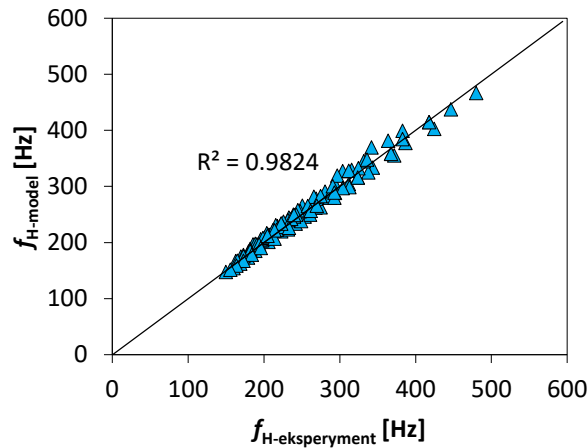
Rys. 17. Sprawność energetyczna generator strugi syntetycznej określona z prędkości w funkcji bezwymiarowej długości skoku.

W publikacji [A11] zaprezentowano wyniki pomiarów pól prędkości strugi syntetycznej dla liczby Reynoldsa wynoszącej 5000 oraz bezwymiarowej długości skoku $L_0 = 2$ oraz 10 dla trzech dysz o różnym kształcie tj. dyszy okrągłej, kwadratowej oraz prostokątnej, o takim samym polu powierzchni dyszy. Wykorzystano system anemometrii obrazowej PIV 2D w celu zarejestrowania pól prędkości w powietrzu. W artykule zaprezentowano wpływ kształtu dyszy oraz bezwymiarowej długości skoku na pola prędkości średniej w czasie, wirowość oraz energię kinetyczną turbulencji w zakresie $0 < x/d < 10$. Na rysunku 18 zaprezentowano pole prędkości strugi syntetycznej uśrednionej w czasie dla $Re=5000$, $L_0=2$. Prędkości maksymalne występują w osi strumienia oraz dla $x/d=2$, natomiast prędkości uśrednione w czasie maleją do zera dla $x/d \rightarrow 0$, co jest cechą charakterystyczną tego typu przepływu.



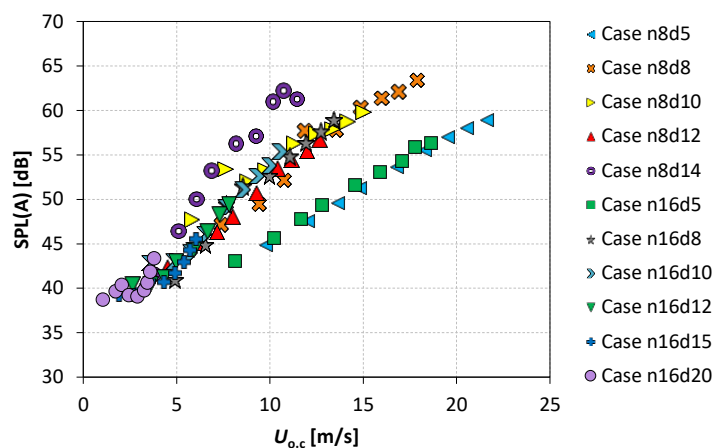
Rys. 18. Pole prędkości strugi syntetycznej uśrednionej w czasie dla $Re=5000$, $L_0=2$. Prędkość średnia U została ubezwymiarowana prędkością charakterystyczną U_e (równanie 3).

Generatory strugi syntetycznej osiągają najwyższe wartości liczby Reynoldsa oraz sprawności dla częstotliwości rezonansowych [A9]. Dlatego ważnym jest przy projektowaniu nowych urządzeń precyzyjne określenie częstotliwości rezonansowych. Częstotliwość rezonansowa głośnika jest podawana przez producenta, natomiast częstotliwość rezonansowa Helmholtza jest określana z objętości komory oraz średnicy i długości dyszy. Dostępne modele umożliwiające określenie częstotliwości rezonansowej Helmholtza nie zgadzały się z wynikami pomiarów eksperymentalnych dla generatorów strugi syntetycznej, a błędy sięgały 50%. W publikacji [A13] zaprezentowano ulepszony model matematyczny umożliwiający określenie wartości częstotliwości rezonansowej Helmholtza dla generatorów strugi syntetycznej. Zmodyfikowany model został opracowany na podstawie badań eksperymentalnych 108 różnych konfiguracji generatorów strugi syntetycznej. Uzyskano zgodność wyników pomiarów dla 95% punktów pomiarowych (rys. 19) z błędem $\pm 6\%$. Zaproponowany model umożliwia precyzyjne projektowanie nowych generatorów strugi syntetycznej.



Rys. 19. Porównanie ulepszonoego modelu do określania częstotliwości rezonansowej Helmholtza f_H z wynikami eksperymentu (108 punktów pomiarowych)

Wysokie wartości prędkości na wylocie z dyszy generatora strugi skutkują wysokim poziomem ciśnienia akustycznego SPL. Jest to wada, poziom ciśnienia akustycznego należy obniżyć do takiej wartości, aby systemy chłodzenia oparte na generatorach strugi syntetycznej nie było uciążliwe dla użytkowników. W publikacji [A7] zaprezentowano metody redukcji poziomu ciśnienia akustycznego generatorów strugi syntetycznej. Zaobserwowano, że wraz z dwukrotnym zwiększaniem mocy elektrycznej dostarczanej do generatora następuje przyrost poziomu ciśnienia akustycznego SPL o +3dB (rys. 20). Zaobserwowano również, że dla tych samych mocy elektrycznych dostarczanych do generatora, dla małych średnic dyszy, prędkości strugi są bardzo wysokie i wraz z tym zostaje osiągnięty wysoki poziom SPL. Zwiększając średnicę dyszy, prędkości maleją, co skutkuje zmniejszeniem wartości SPL (rys. 20).



Rys. 20. Poziom ciśnienia akustycznego generowanego przez generator strugi syntetycznej w funkcji prędkości powietrza w dyszy dla różnych generatorów (liczba po n oznacza liczbę dysz, liczba po d oznacza średnicę w mm, np. n8d5 oznacza generator z 8 dyszami, każda o średnicy 5mm).

W publikacji [A15] badano wpływ ożebrowania komory generatora strugi syntetycznej oraz wpływ dwóch głośników o różnych parametrach i różnych częstotliwościach rezonansowych na poziom ciśnienia akustycznego generatora. Głośniki miały częstotliwości rezonansowe wynoszące odpowiednio 28Hz oraz 64Hz. Generator strugi syntetycznej wykorzystujący głośnik o niższej częstotliwości rezonansowej, w zależności od doprowadzanej mocy elektrycznej, generował poziom ciśnienia akustycznego o 10-14dB niższy niż generator z głośnikiem o wyższej częstotliwości rezonansowej. Redukcja poziomu ciśnienia akustycznego SPL występująca przy niskich częstotliwościach (<100 Hz) jest efektem szybkiego spadku krzywych izofonicznych wraz ze zmniejszaniem częstotliwości.

W publikacji [A14] zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych generatorów strugi syntetycznej napędzanych głośnikami o różnych parametrach: różna impedancja znamionowa, częstotliwość rezonansowa, masa membrany. Podczas eksperymentu założono, że każdy z głośników będzie pracował przy takiej samej mocy elektrycznej oraz przy swojej częstotliwości rezonansowej. Dokonano pomiarów prędkości skutecznej anemometrem, poziomu ciśnienia akustycznego SPL, rezystancji termicznej chłodzonego radiatora. Z pomiarów wynika, że różne głośniki, w zależności od jakości wykonania, generują różne poziomy ciśnienia akustycznego oraz różne charakterystyki cieplno-przepływowe dla tych samych mocy elektrycznych.

Wyniki badań eksperymentalnych wpływu strugi syntetycznej na możliwość sterowania oporem aerodynamicznym bryły nie-opływowej zawarto w pracy [A4]. W ramach pracy został zbudowany model pocisku z ostro ściętym tyłem, w którym zainstalowano generator strugi syntetycznej. Badania eksperymentalne były prowadzone w tunelu aerodynamicznym o średnicy roboczej wynoszącej 1000mm i prędkości przepływu do 45 m/s. Przeprowadzone badania doprowadziły do wniosku, że struga syntetyczna umożliwia redukcję współczynnika oporu aerodynamicznego o -6%, jak również umożliwia zwiększenie oporu aerodynamicznego o +22% w stosunku do przypadku, gdy generator strugi jest wyłączony. Sterowanie oporem aerodynamicznym poprzez wykorzystanie strugi syntetycznej polega na kontroli oderwania płynu na ostrej krawędzi modelu, co w konsekwencji wpływa na rozkład ciśnienia za modelem.

Innowacyjne metody badawcze, które znalazły zastosowanie w omówionych powyżej badaniach eksperymentalnych charakterystyk przepływowych strugi syntetycznej, można zaszeregować w dwie podstawowe grupy. Grupa pierwsza to metody bazujące na prostych przyrządach pomiarowych zastosowanych do wyznaczenia podstawowych parametrów charakteryzujących przepływ strugi syntetycznej, które to parametry są następnie w sposób niekonwencjonalny wykorzystane do opisu zjawisk fizycznych oraz charakterystyk energetycznych strugi syntetycznej. Do drugiej grupy wchodzi konwencjonalna metoda PIV, służąca do określenia pola prędkości przepływu przy wykorzystaniu rozpraszania światła laserowego na cząsteczkach podążających za przepływem. W tym przypadku,

innowacyjność metody odnosi się do zastosowania jej w specyficznym przypadku przepływu jakim jest przepływ strugi syntetycznej.

Na bazie eksperymentalnych badań charakterystyk przepływowych strugi syntetycznej, prowadzonych przy wykorzystaniu powyższych metod, wyłaniają się zasadnicze wnioski:

- najwyższe wartości liczb Reynoldsa oraz sprawności energetycznej generatora strugi syntetycznej są osiągnane przy częstotliwości rezonansowej głośnika oraz częstotliwości rezonansowej Helmholtza zależnej od objętości komory oraz średnicy i długości dyszy,

- związek pomiędzy siłą odrzutu generatora strugi, a jej prędkością charakterystyczną daje możliwość wyznaczenia w szybki i prosty sposób liczb bezwymiarowych charakteryzujących przepływ oraz sprawności energetycznej,

-zastosowana metoda PIV umożliwiła wyznaczenie pól parametrów przepływowych niemożliwych do rejestracji metodami punktowymi,

- ze względu na dużą dynamikę zmian prędkości i wysoką wirowość podczas generacji strugi, badania przy użyciu metody PIV stanowią duże wyzwanie eksperymentalne wymagające walidacji, na przykład poprzez specjalne zastosowanie anemometrii stałotemperaturowej.

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

Po uzyskaniu stopnia doktora moja działalność naukowa, udokumentowana publikacjami naukowymi, wyjazdami zagranicznymi oraz wystąpieniami i patentami, była głównie związana z tematyką badawczą obejmującą zagadnienia strugi syntetycznej.

Projekt badawczy [F1] LIDER X edycja finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, którego byłem kierownikiem, był realizowany we współpracy z Politechniką Bydgoską – panem dr. inż. Emilem Smykiem. W przeciągu trzech lat trwania projektu wykonano prace badawcze systemu chłodzenia przemysłowej oprawy oświetleniowej z wykorzystaniem patentu [K3]. Wyniki prac zostały opublikowane w międzynarodowych czasopismach [A7], [A11], [A12] oraz [A15]. Współpraca naukowa z Politechniką Bydgoską trwała już od 2018 roku, efektem jest publikacja z roku 2019 [A10] oraz zgłoszenie wzoru użytkowego [L1]. Podczas trwania projektu LIDER nawiązałem również współpracę z naukowcami z Czech (Uniwersytet w Liberec, Uniwersytet Technologiczny w Brnie). Współpraca zakończyła się wspólną publikacją [A11].

Po uzyskaniu stopnia doktora odbyłem krajowy staż naukowy [G2] w okresie od 01.08.2019 do 31.01.2020 w dziale badawczo-rozwojowym Zakładu Produkcji Usługowego Mirosław Pogoda

Mielec, w ramach projektu RPPK.01.02.00-18-0009/18-00 pt. „Opracowanie i wdrożenie do produkcji innowacyjnej rozdzielaczowej modułowej pompy wtryskowej z zastosowaniem dla silników wysokoprężnych”. W ramach stażu prowadziłem analizy, badania numeryczne i eksperymentalne komponentów pompy wtryskowej pod względem przepływowym i wytrzymałościowym.

W okresie od 14.11.2022 do 21.11.2022 odbyłem zagraniczny staż naukowy [G3] w J.- R. Mayer Institute and the Laboratory for Energy Technology at the Bremen University of Applied Sciences. Brema, Niemcy. Podczas stażu odbyły się wizytacje i konsultacje naukowe w laboratoriach dynamiki płynów, termodynamiki oraz techniki raketowej, oraz zostały wymienione doświadczenia w zakresie programowania LabVIEW. Został również wygłoszony referat pt. „Flow and heat transfer characteristics of synthetic jet cooling”. Nawiązana współpraca z prof. Sławomirem Smoleniem zakończyła się wspólną publikacją [A8].

Moja współpraca naukowa była również realizowana w przedsiębiorstwach krajowych w ramach prowadzonych projektów i grantów badawczych. W ramach projektu [F2] została nawiązana współpraca z firmą MAR-SPAW w Tryńcy, której rezultatem była publikacja [C35]. W ramach projektu [F1] została nawiązana współpraca z firmą LUXON w Krępicach - publikacja [A8]. Z kolei projekt [M1] we współpracy z firmą SZEL-TECH z Mielca, zaowocował publikacją [C33].

W ramach działalności naukowej uczestniczyłem w międzynarodowych konferencjach krajowych i zagranicznych [D14-D18].

Jestem również aktywnie zaangażowany w proces recenzowania prac naukowych z zakresu mechaniki płynów, wymiany ciepła i termodynamiki. Współpracuję w charakterze recenzenta z wieloma międzynarodowymi czasopismami posiadającymi współczynnik wpływu (IF), czego efektem jest 13 recenzji (II.7.B).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

Od początku zatrudnienia na Politechnice Rzeszowskiej prowadziłem zajęcia laboratoryjne, ćwiczeniowe oraz wykładowe z przedmiotów:

- ✓ Termodynamika
- ✓ Termodynamika techniczna
- ✓ Urządzenia i technologie energetyczne
- ✓ Wymiana ciepła
- ✓ Equipment and energy technologies (Erasmus)

na kierunkach:

- ✓ Mechanika i budowa maszyn

- ✓ Lotnictwo i kosmonautyka
- ✓ Energetyka
- ✓ Transport
- ✓ Mechatronika.

Ponadto byłem promotorem 8 prac dyplomowych, w tym 7 prac inżynierskich i 1 pracy magisterskiej. Jestem również promotorem pomocniczym w realizowanej rozprawie doktorskiej mgr. inż. Marka Markowicza.

Jestem współautorem pomocniczych materiałów dydaktycznych:

- ✓ Gałek R., **Gil P.**, Grosicki S., Smusz R., Szewczyk M., Tychanicz M., Wilk J., Wolańczyk F.: *Termodynamika laboratorium – materiały pomocnicze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2017. ISBN 978-83-7934-127-6.
- ✓ Wolańczyk F., Gałek R., **Gil P.**, Szewczyk M.: *Urządzenia energetyczne: laboratorium – materiały pomocnicze*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2020. ISBN 978-83-7934-374-4.

Jestem autorem rozdziału i redaktorem naukowym skryptu:

- ✓ Gil P.: *Pomiary temperatury*, s. 153-204. [W:] Gil P. red.: *Termodynamika - pomiary*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2018. ISBN 978-83-7934-239-6.

Brałem również udział w tworzeniu nowych oraz modernizowaniu istniejących dydaktycznych i naukowych stanowisk badawczych:

- ✓ Budowa nowego stanowiska do badania wpływu ożebrowania rury na warunki wymiany ciepła przy konwekcji swobodnej w powietrzu
- ✓ Budowa systemu klimatyzacji pasywnej opartej o gruntowy wymiennik ciepła
- ✓ Uruchomienie stanowiska do jednoczesnego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w układzie kogeneracji
- ✓ Modernizacja laboratorium do badania zjawisk konwekcyjnej wymiany masy/ciepła techniką sublimacji naftalenu
- ✓ Budowa nowego stanowiska do badania współczynników przewodzenia ciepła otulin rur
- ✓ Modernizacja stanowiska do pomiarów rozkładu temperatur w gruncie wokół gruntowego spiralnego wymiennika ciepła pompy ciepła
- ✓ Modernizacja stanowiska do pomiaru sprawności systemu fotowoltaicznego
- ✓ Organizacja nowych laboratoriów: do pomiarów metodą PIV oraz do pomiarów właściwości promieniowania słonecznego.

.....
(podpis wnioskodawcy)