

# **Autoreferat**

## **OPRACOWANIE METOD ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIENÍ BEZPOŚREDNICH I ODWROTNYCH PRZEWODNICTWA CIEPŁA ORAZ ICH ZASTOSOWANIE DO ANALIZY PRZEPLYWU CIEPŁA W PROCESACH OBRÓBK CIEPLNO-CHEMICZNEJ**

**dr inż. Magda Joachimiak**

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Energetyki Ciepłej

ul. Piotrowo 3, 60-138 Poznań

**1. Imię i nazwisko:** Magda Joachimiak

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

2014 – doktor nauk technicznych, dyscyplina: Budowa i Eksploatacja Maszyn, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska

Temat rozprawy doktorskiej: **Analiza procesu nagrzewania w oparciu o rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła** (promotor prof. dr hab. inż. Michał Ciałkowski)

2012 – inżynier mechanik, kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność: Technika Ciepła, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska

2010 – magister matematyki, kierunek: Matematyka, specjalność: Matematyka Stosowana, Wydział Matematyki i Informatyki, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Studia podyplomowe: Przygotowanie edukacyjne do nauczania przedmiotów ogólnych i techniczno-zawodowych, Politechnika Poznańska

**3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.**

1.2020-obecnie Instytut Energetyki Ciepłej, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Poznańska, adiunkt;

10.2019-12.2019 Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Transportu, Politechnika Poznańska, adiunkt;

10.2018-9.2019 Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Transportu, Politechnika Poznańska, asystent;

10.2013-10.2018 Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska, asystent;

**4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.).**

**4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego**

**OPRACOWANIE METOD ROZWIĄZYWANIA ZAGADNIEŃ BEZPOŚREDNICH I ODWROTNYCH PRZEWODNICTWA CIEPŁA ORAZ ICH ZASTOSOWANIE DO ANALIZY PRZEPŁYWU CIEPŁA W PROCESACH OBRÓBKI CIEPLNO-CHEMICZNEJ**

**4.2 Osiągnięcie naukowe - złożone z monografii, jednotematycznego cyklu publikacji naukowych, patentu oraz oryginalnych osiągnięć technicznych:**

**[1] Monografia:**

**Joachimiak M.,** *Metody rozwiązywania zagadnień bezpośrednich i odwrotnych przewodnictwa ciepła oraz ich zastosowanie do analizy przepływu ciepła w procesach obróbki cieplno-chemicznej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2021.

**a) Artykuły naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports**

Opis udziałów merytorycznych oraz procentowych poniższych prac znajduje się w Wykazie Osiągnięć Naukowych

- [2] **Joachimiak M.**, Joachimiak D., Ciałkowski M., Małdziński L., Okoniewicz P., Ostrowska K., *Analysis of the heat transfer for processes of the cylinder heating in the heat-treating furnace on the basis of solving the inverse problem*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 145, 2019, 105985, pp. 1-11.  
doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.105985  
140 pkt, IF 3.476, procentowy udział w pracy 50%
- [3] **Joachimiak M.**, Ciałkowski M., Frąckowiak A., *Stable method for solving the Cauchy problem with the use of Chebyshev polynomials*, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, vol. 30, no. 3, 2020, pp. 1441-1456.  
doi.org/10.1108/HFF-05-2019-0416  
100 pkt, IF 4.170, procentowy udział w pracy 80%
- [4] **Joachimiak M.**, *Choice of the regularization parameter for the Cauchy problem for the Laplace equation*, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, vol. 30, no. 10, 2020, pp. 4475-4492.  
doi.org/10.1108/HFF-10-2019-0730  
100 pkt, IF 4.170, procentowy udział w pracy 100%
- [5] **Joachimiak M.**, *Analysis of Thermodynamic Parameter Variability in a Chamber of a Furnace for Thermo-Chemical Treatment*, Energies, vol. 14, no. 10, 2021, pp. 2903-1 – 2903-18.  
doi.org/10.3390/en14102903  
140 pkt, IF 3.004, procentowy udział w pracy 100%
- [6] Ciałkowski M., Olejnik A., **Joachimiak M.**, Grysa K., Frąckowiak A., *Cauchy type nonlinear inverse problem in a two-layer area*, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, vol. ahead-of-print, no. ahead-of-print, 2021.  
doi.org/10.1108/HFF-09-2020-0584  
100 pkt, IF 4.170, procentowy udział w pracy 20%

**b) Artykuły w czasopismach z listy B MNiSW oraz z konferencji naukowych ujęte w czasopismach indeksowanych w bazie Scopus i innych bazach**

**Publikacje w czasopismach z listy B MNiSW indeksowane w Web of Science:**

- [7] **Joachimiak M.**, Frąckowiak A., Ciałkowski M., *Solution of inverse heat conduction equation with the use of Chebyshev polynomials*, Archives of Thermodynamics, vol. 37, no. 4, 2016, pp.73-88.  
10.1515/aoter-2016-0028  
13 pkt (aktualna punktacja wg MNiSW 40 pkt), udział w pracy 70%,

**c) Patenty oraz prace wdrożeniowe,**  
brak



Tabela 1. Wykaz osiągnięć naukowo – badawczych wchodzących w skład głównego osiągnięcia naukowego

Rodzaj dorobku		Łącznie	Liczba punktów MNiSW
1	Monografia	1	80
2	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych w JCR (lista A MNiSW)	5	580
3	Publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych w bazie Scopus i Web of Science	1	13 (*40)
	<b>Publikacje łącznie</b>	<b>7</b>	<b>673 (*700)</b>
	Sumaryczny IF		<b>18.990</b>

\* uwzględniono aktualną punktację wg MNiSW

### Omówienie prac wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Zagadnienie bezpośrednie (ang. *direct problem*) jest problemem dobrze postawionym w sensie Hadamarda, co oznacza, że rozwiązanie istnieje, jest jednoznacznie określone oraz stabilne. Przewodzenie ciepła w ciele stałym przy znanych warunkach geometrycznych ciała (kształcie i wymiarach), własnościach fizycznych ciała (współczynniki przewodzenia ciepła, ciepło właściwe i gęstości), rozkładzie i wydajności wewnętrznych źródeł ciepła oraz warunkach początkowych i brzegowych jest problemem bezpośrednim mającym jednoznaczne rozwiązanie [1].

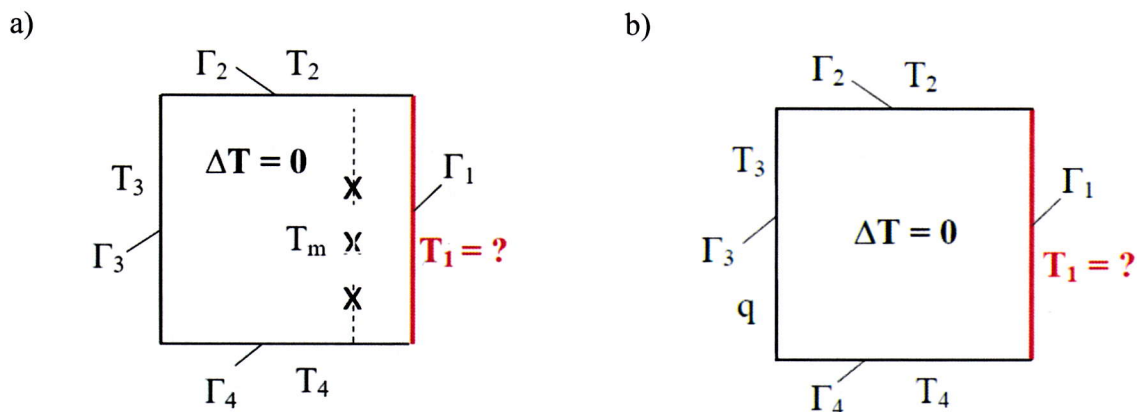
Zagadnienie odwrotne (ang. *inverse problem*) jest zagadnieniem źle postawionym w sensie Hadamarda. Oznacza to, że problem ten nie spełnia przynajmniej jednego z warunków definicji dobrze postawionego zagadnienia. Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego może nie istnieć, nie mieć jednoznacznego rozwiązania lub może być niestabilne. Rozwiązanie jest niestabilne gdy niewielkie zaburzenie danych wejściowych istotnie zaburza rozwiązanie [1].

Wśród rodzajów zagadnień odwrotnych wyróżniamy problemy dotyczące określania kształtu obszaru (geometryczne zagadnienie odwrotne), identyfikacji własności fizycznych materiału (współczynniki zagadnienie odwrotne), rozmieszczenia źródeł ciepła czy też określenia warunków początkowych i brzegowych [1].

Prowadzone przeze mnie prace badawcze dotyczyły rozwiązania zagadnień bezpośrednich i odwrotnych dla równania przewodnictwa ciepła wraz z ich regularyzacją. Opracowane przeze mnie algorytmy rozwiązywania zagadnień odwrotnych przewodnictwa ciepła zastosowałam do wyznaczania nieznanego warunku brzegowego na powierzchni próbki podczas procesów nagrzewania w piecu do obróbki cieplno-chemicznej [1, 2, 5]. Zakres zagadnień obejmował: tworzenie własnych modeli obliczeniowych, testy numeryczne, analizę stabilności rozwiązań zagadnień odwrotnych, badania eksperymentalne oraz obliczenia dla danych eksperymentalnych.

Analizowałam stacjonarne przewodzenie ciepła (równanie Laplace'a) w obszarze prostokątnym z zastosowaniem wielomianów i węzłów Czebyszewa [3, 4, 7]. W zagadnieniu odwrotnym poszukiwałam nieznanego warunku brzegowego na jednym z brzegów prostokąta (brzeg  $\Gamma_1$ , rys. 1), korzystając z informacji o wartości temperatury w punktach wewnątrz obszaru umieszczonych w jednym rzędzie (brzegowe zagadnienie odwrotne, rys. 1a), dwóch rzędach (zagadnienie quasi-Cauchy'ego) oraz dodatkowej informacji na temat gęstości strumienia ciepła na jednym z brzegów obszaru (zagadnienie Cauchy'ego, rys. 1b).





Rys. 1. Brzegowe zagadnienie odwrotne (x – miejsca pomiaru temperatury  $T_m$ ) (a) Zagadnienie Cauchy'ego (b)

Zagadnienia tego typu są źle postawione w sensie Hadamarda i wymagają regularyzacji. W celu uzyskania stabilnego rozwiązania stosowałam różne techniki mianowicie regularyzację Tikhonova oraz Tikhonova-Philipsa i ich modyfikacje [1, 3, 4]. Wprowadziłam funkcjonal regularyzujący obejmujący powyższe regularyzacje w następującej postaci

$$J_\alpha = J(\gamma) + \alpha^2 I(\gamma) = \|\mathbf{B}\mathbf{M}\gamma - \mathbf{B}\mathbf{W}\|^2 + \alpha^2 \int_{\Gamma_1} \left( \sum_{p=0}^q a_p \left( \frac{\partial^{(p)} \tilde{T}}{\partial y^{(p)}} \right)^2 \right) d\Gamma_1 \quad (1)$$

gdzie  $a_p \in \{0,1\}$ . Modyfikacje obejmowały różne postacie funkcjonu (1) wynikające z przyjętych wartości parametrów  $a_p$ . Parametr regularyzacji  $\alpha$  dobrałam na podstawie kryterium Morozowa, minimum całki energii oraz metody L-krzywej [1, 3, 4].

Testy numeryczne dla stacjonarnych zagadnień odwrotnych przewodzenia ciepła obejmowały:

- analizę wpływu wielkości losowego zaburzenia temperatury oraz położenia punktów pomiarowych na uzyskiwane rozwiązanie brzegowego zagadnienia odwrotnego i zagadnienia quasi-Cauchy'ego [1, 7],
- wykazanie konieczności regularyzacji zagadnienia Cauchy'ego [1, 4],
- dobór metody regularyzacji oraz parametru regularyzacji dla zagadnienia Cauchy'ego [1, 3, 4],
- szczegółową analizę regularyzacji zagadnienia Cauchy'ego z wykorzystaniem kryterium minimum całki energii [1, 4],
- analizę wpływu zaburzenia gęstości strumienia ciepła na rozkład temperatury na brzegu  $\Gamma_1$  dla zagadnienia Cauchy'ego [1, 3, 4],
- analizę wpływu położenia osobliwości funkcji na rozkład temperatury na brzegu  $\Gamma_1$  dla zagadnienia Cauchy'ego [1].

Parametr regularyzacji  $\alpha$  dobrałam z zastosowaniem kryterium Morozowa na podstawie oszacowania średniego oraz maksymalnego błęd gęstości strumienia ciepła  $\delta_M$  na brzegu  $\Gamma_3$  (rys. 1b). Wyboru parametru  $\alpha$  dokonałam również, uwzględniając kryterium minimum całki energii oraz metodę L-krzywej. W celu oceny doboru parametru regularyzacji obliczyłam wartości normy bezwzględnej  $N_2$

$$N_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^m (T_{\Gamma_1,AS}(y_i) - T_{\Gamma_1,IP}(y_i))^2} \quad (2)$$

oraz względnej  $N_{\max}$

$$N_{\max} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} |T_{\Gamma_1, AS}(y_i) - T_{\Gamma_1, IP}(y_i)|}{\max_{1 \leq i \leq m} |T_{\Gamma_1, AS}(y_i)|} \quad (3)$$

gdzie  $T_{\Gamma_1, IP}$  oznacza wartość temperatury na brzegu  $\Gamma_1$  obliczoną za pomocą zagadnienia odwrotnego, natomiast  $T_{\Gamma_1, AS}$  wartość temperatury na brzegu  $\Gamma_1$  uzyskaną z rozwiązania analitycznego.

Rozkłady temperatury uzyskane metodą L-krzywej istotnie różniły się od rozwiązania analitycznego [1, 4]. Wystąpił problemem jednoznacznego wyznaczenia parametru  $\alpha$  na podstawie przebiegów L-krzywej. Największe wartości normy  $N_{\max}$  otrzymałam dla kryterium Morozowa przy oszacowaniu średniego błędu gęstości strumienia ciepła  $\delta_M$  na brzegu  $\Gamma_3$ . Najkorzystniejsze wyniki uzyskałam dla kryterium minimum całki energii oraz kryterium Morozowa dla maksymalnego błędu gęstości strumienia ciepła  $\delta_M$  na brzegu  $\Gamma_3$  [1, 4]. Regularyzacja z zastosowaniem kryterium minimum całki energii jednoznacznie określa wartość parametru regularyzacji  $\alpha$  oraz daje zadowalające wyniki. Jednak wadą metody jest to, iż nie dla wszystkich przykładów obliczeniowych istnieje minimum całki energii. Dla kryterium Morozowa otrzymany rozkład temperatury na brzegu  $\Gamma_1$  zależy od oszacowania wartości  $\delta_M$ . Niedokładne oszacowanie błędów danych wejściowych (gęstości strumienia ciepła) może skutkować otrzymaniem rozwiązania obciążonego bardzo dużym błędem. Uzyskane wyniki wskazują, że przy zastosowaniu właściwej metody regularyzacji oraz metody doboru parametru regularyzacji możliwe jest uzyskanie stabilnego rozwiązania zagadnienia odwrotnego o małej wrażliwości na zaburzenie danych wejściowych [1, 3, 4].

Analizowałam rozwiązanie niestacjonarnego, jednowymiarowego zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła w obszarze dwuwarstwowym [6]. Badałam wpływ zastosowania bilansu energii (quasi-regularyzacja) na rozwiązanie zagadnienia odwrotnego. Liczne przykłady numeryczne wskazują na możliwość uzyskania stabilnego rozwiązania bez konieczności stosowania klasycznej regularyzacji.

Badania numeryczne obejmowały również opracowanie rozwiązania niestacjonarnego zagadnienia odwrotnego z uwzględnieniem zależności współczynnika przewodzenia ciepła oraz ciepła właściwego od temperatury w walcu. Nieliniowy problem rozwiązałam z zastosowaniem przekształcenia Kirchhoffa. Analizowałam dwa warianty problemu odwrotnego. Poszukiwałam temperatury na brzegu obszaru (wariant A) lub gęstości strumienia ciepła (wariant B, metoda Becka). Opracowałam schemat obliczeniowy pozwalający na uzyskanie dla każdego z wariantów (A oraz B) temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła na brzegu walca [1-2]. Dla opracowanych algorytmów wykonałam szereg testów numerycznych. Badałam wpływ zaburzenia danych pomiarowych (błąd pomiaru temperatury, błąd zabudowy termoelementów) na rozwiązanie zagadnienia odwrotnego.

Liczne przykłady testowe wskazują na:

- istotny wpływ wartości błędu pomiaru temperatury na uzyskiwane wartości temperatury na brzegu,
- istotny wpływ położenia termoelementów na uzyskiwane wartości temperatury na brzegu,
- znacznie mniejszy wpływ błędów zabudowy termoelementów na uzyskiwane wartości temperatury na brzegu.

Analizowałam również wpływ długości kroku czasowego, stanowiącego parametr regularyzacji, na uzyskiwane warunki brzegowe [1-2]. Obliczenia wykonałam dla kroku czasowego  $\Delta t = 1$  s,  $\Delta t = 2$  s,  $\Delta t = 5$  s i  $\Delta t = 10$  s. Błąd bezwzględny będący różnicą między rozwiązaniem analitycznym a rozwiązaniem zagadnienia odwrotnego dla temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła ma przebieg oscylacyjny. Wraz ze zwiększeniem kroku czasowego wartości warunków brzegowych zbliżają się do rozwiązania analitycznego. Właściwy dobór kroku czasowego pozwala na otrzymanie wyników o znacznie mniejszych oscylacjach.



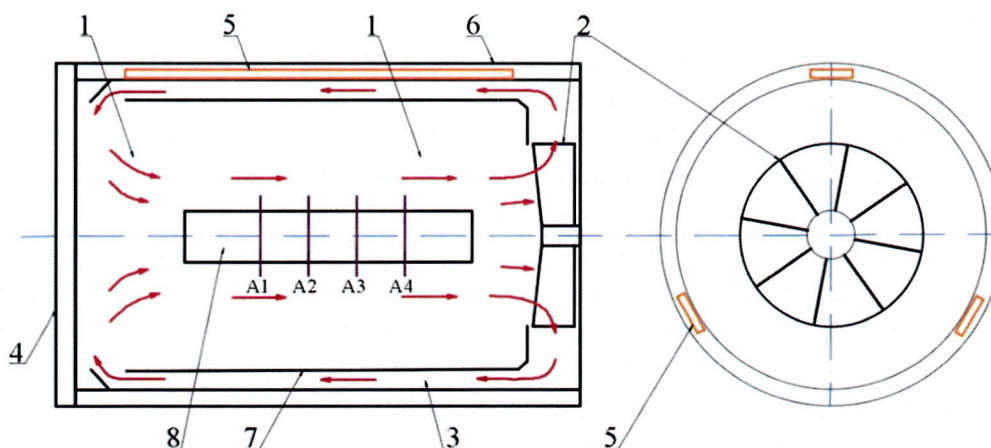
Zadowolające wyniki otrzymałam dla kroku czasowego  $\Delta t = 10$  s. Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych nie stwierdziłam znaczących różnic w otrzymywanych wynikach dla wariantu A i B. Przeprowadzona analiza regularyzacji rozwiązania zagadnienia odwrotnego przez zmianę kroku czasowego pozwoliła na uzyskanie stabilnego rozwiązania o małej wrażliwości na zaburzenie danych wejściowych. Opisane algorytmy zastosowałam do wyznaczania warunków brzegowych dla walca nagrzewanego w piecu do obróbki cieplno-chemicznej.

W procesach obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, takich jak azotowanie, bardzo istotna jest kontrola rozkładów temperatury na brzegu obrabianych elementów ze względu na właściwości tworzących się warstw powierzchniowych. Ważne są również rozkłady temperatury wewnątrz elementu ze względu na powstające różnice temperatury generujące naprężenia termiczne. Ich kontrola pozwala zapobiegać uszkodzeniom elementów. Dotyczy to szczególnie większych elementów o skomplikowanych kształtach i asymetrycznym rozłożeniu masy, takich jak np. wały korbowe, wałki rozrządu, wiele rodzajów kół zębatach [1-2, 5]. Precyzyjna kontrola procesu obróbki cieplno-chemicznej pozwala na optymalizację tych procesów, tzn. maksymalne załadowanie pieca wsadem i skrócenie czasu trwania procesu przy jednoczesnym otrzymaniu elementów o żądanych właściwościach warstwy wierzchniej. Umożliwia ona również ograniczenie, a nawet wyeliminowanie deformacji geometrycznych obrabianych elementów. W praktyce przemysłowej dąży się do maksymalnych możliwych do uzyskania szybkości nagrzewania i chłodzenia, gdyż zapewnia to wysoką produktywność obróbki [1-2, 5].

Warstwa metalu o wysokich parametrach mechanicznych powstaje na skutek tworzenia się warstwy dyfuzyjnej w wyniku reakcji chemicznych na powierzchni i dyfuzji wprowadzanych pierwiastków w strefie przypowierzchniowej [1-2]. Aby wytworzone warstwy dyfuzyjne, powstające w wyniku przeprowadzenia procesu obróbki cieplno-chemicznej, były prawidłowe, z potencjałem azotowym atmosfery (dla azotowania) czy też potencjałem węglowym (dla nawęglania) musi być skorelowana temperatura [1-2]. Konieczne jest kontrolowanie i regulowanie temperatury powierzchni oraz w strefie przypowierzchniowej. Kontrola ta może odbywać się przez regulację szybkości nagrzewania obrabianego cieplno-chemicznie wsadu. Dotychczas opracowano modele kinetyki wzrostu warstwy na stalach, a jednym ze słabych punktów tych modeli jest ograniczona znajomość temperatury powierzchni i w strefie przypowierzchniowej [2].

Podczas procesów obróbki cieplno-chemicznej pojawia się problem z dokładnym pomiarem temperatury na brzegu elementów [1-2]. Wówczas przepływ ciepła zachodzi przez konwekcję oraz w znacznym stopniu przez promieniowanie. Stosowanie powszechnie znanych modeli obliczeniowych dotyczących przepływu ciepła w piecach do obróbki cieplno-chemicznej nie jest wystarczające do precyzyjnej kontroli tych procesów. Temperaturę na brzegu ciała stałego można również wyznaczyć, wykonując pomiary temperatury wewnątrz niego (możliwie blisko brzegu) oraz rozwiązując zagadnienie odwrotne dla równania przewodnictwa ciepła [1-7]. Rozkłady temperatury w nagrzewanym elemencie (a w szczególności na jego brzegu), gęstość strumienia ciepła oraz współczynniki przejmowania ciepła uzyskane przez rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dają spójną wiedzę o procesie przepływu ciepła w obrabianym cieplno-chemicznie elemencie.





Rys. 2. Szkic pieca z zaznaczonym kierunkiem przepływu gazu: 1 - komora robocza pieca, 2 - wentylator, 3 - kanał pierścieniowy, 4 - drzwi, 5 - element grzewczy, 6 - ścianka zewnętrzna pieca, 7 - przegroda cylindryczna, 8 – walec z zaznaczonymi płaszczyznami pomiarowymi A1 – A4.

Badania eksperymentalne obejmowały pomiar temperatury gazu w piecu oraz temperatury wewnątrz walca wykonanego ze stali (rys. 2). Nagrzewania walca w atmosferze azotu wykonano od temperatury otoczenia do temperatury  $T_{\max} = 550^{\circ}\text{C}$ . Szybkości nagrzewania nastawione w piecu wynosiły  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$  oraz  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (tabela 1). Nastawionym szybkościom nagrzewania odpowiadają przebiegi temperatury gazu przedstawione na rysunku 3. Szybkość nagrzewania kontrolowano za pomocą termoelementu mierzącego temperaturę gazu w piecu. Prędkość obrotowa wentylatora stanowiła 50% oraz 100% prędkości maksymalnej (tabela 1), wynoszącej 2800 obr/min. Badania eksperymentalne wykonano pod kątem azotowania gazowego.

Tabela 1. Parametry procesów nagrzewania

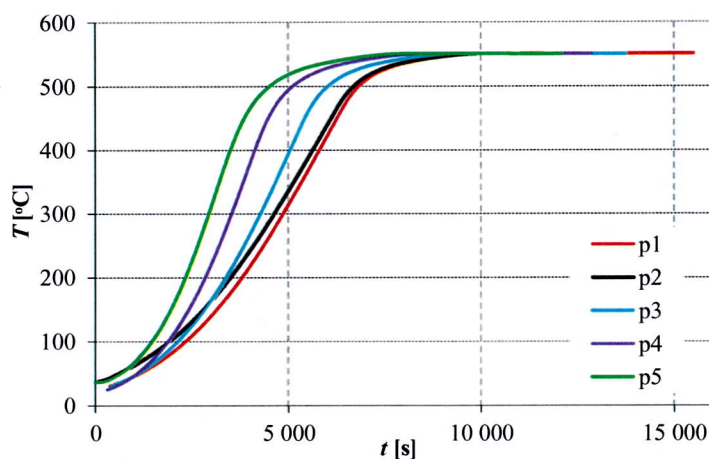
Proces	Szybkość nagrzewania [ $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ]	Ustawienie wentylatora [%]
p1	5	50
p2	5	100
p3	6	50
p4	8	50
p5	10	50

Ze względu na wysokie temperatury procesu nagrzewania podczas azotowania sięgające  $550^{\circ}\text{C}$  przepływ ciepła do walca zachodzi zarówno przez konwekcję, jak i przez radiację. Konwekcja wynika z wymuszonego przez wentylator przepływu gazu. Radiacja jest spowodowana promieniowaniem zarówno ścianek pieca, jak i gazu znajdującego się wewnątrz niego. Współczynnik przejmowania ciepła  $h$  jest miarą przepływu ciepła odbywającego się przez konwekcję i radiację. Przeprowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie tego współczynnika dla procesów nagrzewania o parametrach charakterystycznych dla azotowania. Wyznaczyłam również wartości temperatury oraz gęstości strumienia ciepła na brzegu walca. Podczas badań eksperymentalnych analizowałam pięć procesów różniących się szybkością nagrzewania oraz prędkością przepływu gazu w piecu (tabela 1).

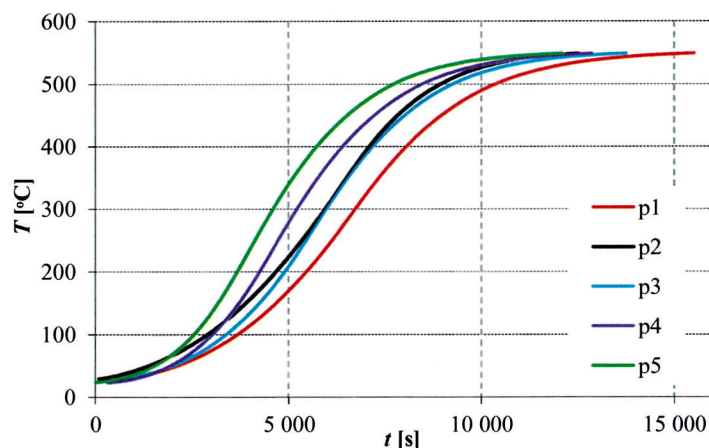
Wykonałam analizę błędów dla przeprowadzonych badań eksperymentalnych i numerycznych. W celu wyznaczenia dokładności otrzymanych wartości temperatury, współczynnika przejmowania ciepła oraz gęstości strumienia ciepła na brzegu walca analizowałam błędy zabudowy termoelementów oraz błędy pomiaru temperatury. W celu szerszej analizy przenoszenia błędów obliczenia wykonałam również dla zawyżonych błędów pomiarowych. Błędy zabudowy oraz pomiaru temperatury dobrałam w taki sposób, aby otrzymać maksymalne możliwe błędy dla rozwiązania

zagadnienia odwrotnego. W początkowym i końcowym okresie nagrzewania wrażliwość rozwiązania zagadnienia odwrotnego jest większa niż w pozostałej części procesu. Przez większość czasu nagrzewania uzyskano warunki brzegowe o dopuszczalnej dokładności.

Wartości temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła na brzegu walca obliczyłam dla obu wariantów modelu obliczeniowego. Przyjęłam warunek brzegowy w postaci temperatury (wariant A) oraz gęstości strumienia ciepła (wariant B). Nieznaczne różnice w otrzymanych wynikach obliczonych za pomocą wariantu A i B wynikają z analityczno-numerycznego modelu obliczeniowego oraz regularyzacji rozwiązania zagadnienia odwrotnego przez dobór kroku czasowego  $\Delta t$ .



Rys. 3. Temperatura gazu dla procesów nagrzewania p1–p5



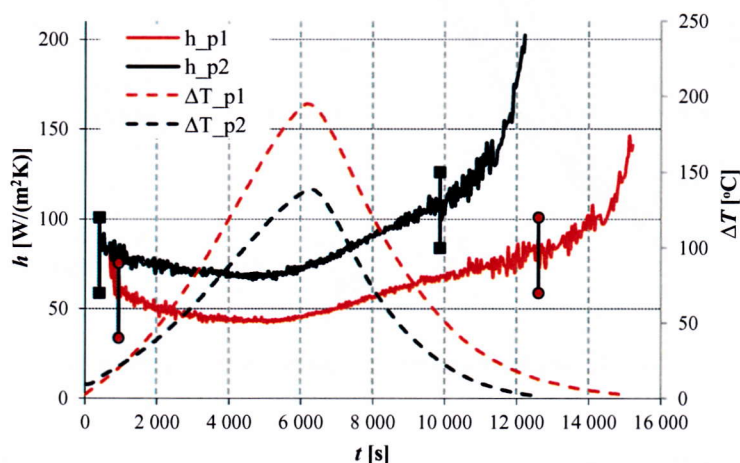
Rys. 4. Temperatura brzegu walca dla procesów nagrzewania p1–p5

Rozwiązanie zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła pozwoliło na wyznaczenie rozkładów temperatury na brzegu walca dla procesów p1–p5 (rys. 4, tabela 1). W początkowym i końcowym okresie pomiaru występują bardzo małe różnice temperatury pomiędzy gazem a powierzchnią zewnętrzną walca (rys. 5 i 6). W przypadku tak małych różnic temperatury niewielkie zaburzenie pomiaru wpływa znacząco na dokładność wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła. Stąd w początkowym i końcowym etapie każdego procesu widoczne są fluktuacje

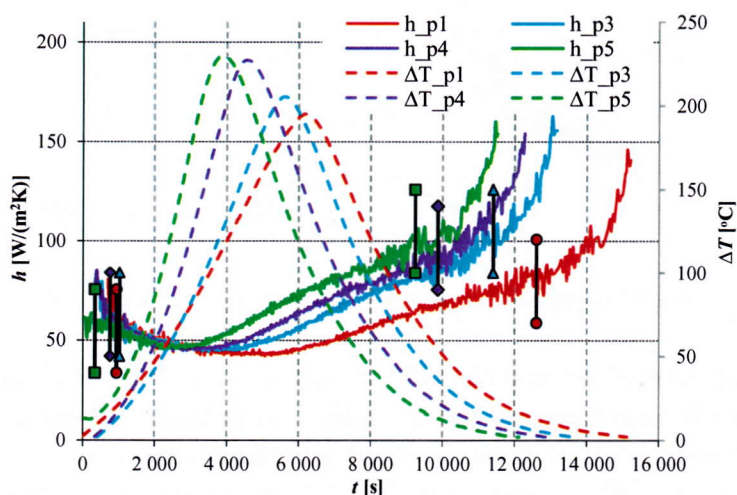


współczynnika. Dopuszczalne wyniki  $h$  o błędzie względnym  $\delta h$  poniżej 0.15 (przedział czasu pomiędzy liniami pionowymi) zaznaczono na rysunkach 5 oraz 6.

Większa prędkość obrotowa wentylatora powoduje zwiększenie współczynnika przejmowania ciepła oraz zmniejszenie różnicy temperatury gazu i powierzchni walca nawet do około  $50^{\circ}\text{C}$ . Proces drugi jest krótszy od pierwszego o około 2500 s (rys. 5). Zwiększenie szybkości nagrzewania powoduje skrócenie czasu procesu (rys. 6). Czas trwania procesu dla najmniejszej (proces p1) i największej (proces p5) szybkości nagrzewania różni się o około 3500 s, co stanowi ponad 20% czasu najdłuższego procesu. Dla większej prędkości nagrzewania maksymalna różnica między temperaturą gazu i brzegu walca występuje wcześniej i ma większą wartość. Wykresy współczynnika przejmowania ciepła mają podobny przebieg, ale wraz ze zwiększeniem szybkości nagrzewania przesuwają się w taki sposób, że wartości maksymalne występują wcześniej. Dla coraz większych prędkości nagrzewania walca minimum  $h$  występuje szybciej. Minimum to wynosi około  $45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Największe wartości współczynników uzyskano w końcowym etapie nagrzewania i wynoszą one od  $85 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  do  $105 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (dla przedziałów czasu o akceptowalnych błędach).

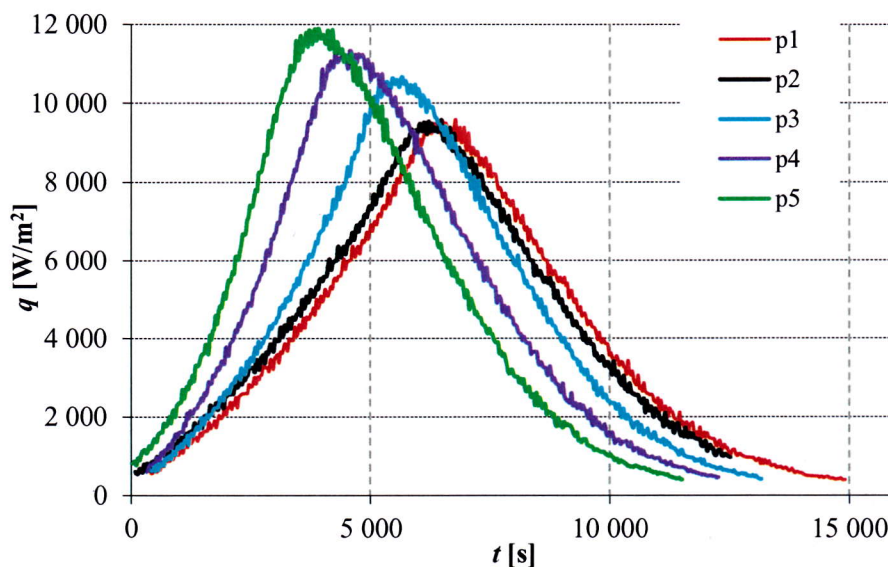


Rys. 5. Współczynnik przejmowania ciepła oraz różnica temperatury gazu w piecu i na brzegu walca dla procesów p1 i p2 z zaznaczonymi przedziałami czasu o akceptowalnych wynikach (linie pionowe)



Rys. 6. Współczynnik przejmowania ciepła oraz różnica temperatury gazu w piecu i na brzegu walca dla procesów p1, p3, p4 i p5 z zaznaczonymi przedziałami czasu o akceptowalnych wynikach (linie pionowe)





Rys. 7. Gęstość strumienia ciepła dla procesów p1–p5

Wraz ze wzrostem szybkości nagrzewania zwiększa się gęstość strumienia ciepła dopływającego do walca przypadający na jednostkę czasu. W rezultacie uzyskuje się coraz krótsze czasy nagrzewania. Dla procesów p1 i p2 zmiana obrotów wentylatora nie powoduje znaczących zmian przepływającego strumienia ciepła od pieca do nagrzewanego walca (rys. 7).

Przeprowadzone badania pozwoliły również na wyznaczenie parametrów termodynamicznych w komorze pieca do obróbki cieplno-chemicznej w czterech płaszczyznach na długości walca A1–A4 (rys. 2). Dla procesów p1-p5 obliczyłam średnie (z płaszczyzn A1-A4) wartości temperatury i współczynnika przejmowania ciepła na brzegu walca. Analizowałam różnice między wartościami temperatury oraz współczynnika przejmowania ciepła na brzegu walca w płaszczyznach A1–A4 (rys. 2) a wartościami średnimi. Odchylenia od wartości średniej stanowiły miarę nierównomierności nagrzewania walca, które badałam z zastosowaniem estymat [1,5].

Największe odchylenie od wartości średniej temperatury uzyskano dla procesu p5 w płaszczyźnie A4. Wyniosło ono  $5.4^{\circ}\text{C}$ . Zmiana nastawienia wentylatora zmniejszyła różnice temperatury na brzegu walca od  $6.8^{\circ}\text{C}$  (proces p1) do  $3.3^{\circ}\text{C}$  (proces p2). Różnica temperatury brzegu walca może sięgać powyżej  $9^{\circ}\text{C}$ . Wyniki wskazują, że podczas nagrzewania dużego wsadu mogą wystąpić znaczące różnice temperatury w nagrzewanych elementach w zależności od ich usytuowania. Średnie odchylenie współczynnika przejmowania ciepła od wartości średniej jest największe przy wentylatorze (płaszczyzna A4) dla wszystkich procesów nagrzewania. Przebieg uzyskanych krzywych współczynnika przejmowania ciepła w różnych płaszczyznach na długości walca w czasie jest zbliżony. Wyznaczone warunki brzegowe mogą stanowić podstawę do optymalizowania procesów obróbki cieplno-chemicznej.

Optymalizacja procesów obróbki cieplno-chemicznej wiąże się ze zmniejszeniem czasu nagrzewania oraz ilości zużytej energii przy jednoczesnym wytworzeniu elementów o żądanych właściwościach powierzchni. Bardzo istotne jest również nagrzewanie elementów z taką szybkością, aby nie zostały przekroczone dopuszczalne naprężenia termiczne. Analizowałam różnice temperatury między brzegiem a osią walca oraz czasy nagrzewania dla nastawionych szybkości nagrzewania wynoszących  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$  oraz  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Zwiększenie szybkości nagrzewania od  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  do  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  pozwoliło na znaczne skrócenie czasu nagrzewania wynoszące około godziny [1]. Spowodowało to niewielki wzrost różnicy temperatury pomiędzy brzegiem a osią walca

wynoszący około 1.1°C. Zmiany szybkości nagrzewania nie spowodowały znacznych zmian w poborze energii przez elementy grzejne [1].

Z przeprowadzonych badań możemy wnioskować, że zastosowane metody rozwiązywania zagadnień odwrotnych mogą stanowić podstawę do optymalizowania procesów obróbki cieplno-chemicznej. Metody przedstawione w pracy mogą zostać zastosowane do analizy zarówno nagrzewania, jak i chłodzenia podczas azotowania. Dają również możliwość przeprowadzenia analizy przepływu ciepła podczas innych procesów obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej, m.in. nawęglania lub obróbki cieplnej w próżni.

Omówione zagadnienia tworzące osiągnięcie naukowe nie powielają się z badaniami przedstawionymi w pracy doktorskiej. Praca doktorska dotyczyła rozwiązywania niestacjonarnego zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła w walcu. Przedstawiono w niej dwa modele liniowe (dla stałego współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  i ciepła właściwego  $c$ ) oraz model nieliniowy. Model nieliniowy uwzględniał zależność współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  i ciepła właściwego  $c$  od temperatury. Pozwalał na obliczenie temperatury na brzegu walca. W pracy doktorskiej przedmiotem badań były procesy nagrzewania w piecu do obróbki cieplno-chemicznej dla szybkości nagrzewania 5°C/min i 10°C/min (50% nastawa wentylatora) oraz dla szybkości nagrzewania 5°C/min (100% nastawa wentylatora). Badania eksperymentalne wykonano dla jednej płaszczyzny na długości walca. Omówione powyżej osiągnięcie naukowe (po doktoracie) obejmuje rozwiązanie niestacjonarnego i nieliniowego zagadnienia odwrotnego, które pozwoliło na wyznaczenie temperatury, gęstości strumienia ciepła oraz współczynnika przejmowania ciepła na brzegu walca. Warunki brzegowe obliczono za pomocą dwóch wariantów programu (A i B). Zastosowano regularyzację krokiem czasowym. Badania eksperymentalne obejmowały szybkości nagrzewania 5°C/min, 6°C/min, 8°C/min i 10°C/min (50% nastawa wentylatora) oraz szybkość nagrzewania 5°C/min (100% nastawa wentylatora). Pomiary wykonywano w czterech płaszczyznach na długości walca. Pozwoliło to na analizę zmienności warunków brzegowych na długości walca, a tym samym komory roboczej pieca.

W pracy doktorskiej nie rozważałam problemu rozwiązywania zagadnienia odwrotnego dla równania Laplace'a. Nie badałam metod regularyzacji zagadnień odwrotnych. Również dobór parametru regularyzacji z zastosowaniem kryterium Morozowa, minimum całki energii oraz L-krzywej nie był analizowany w pracy doktorskiej.

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

- Współpraca naukowa z prof. dr hab. inż. Krzysztofem Gryś (Politechnika Świętokrzyska) oraz prof. dr hab. inż. Aleksandrem Olejnikiem (Wojskowa Akademia Techniczna). Tematyka badawcza dotyczy rozwiązywania zagadnień odwrotnych dla równania przewodnictwa ciepła w obszarze dwuwarstwowym. Wyniki badań zostały opublikowane w pracy [6]
- Współpraca naukowa z prof. dr hab. inż. Piotrem Krzyślakiem pracownikiem Uniwersytetu Morskiego w Gdyni w zakresie badań dotyczących kondensacji. Efektem współpracy było wystąpienie na konferencji Turbiny cieplne: teoria konstrukcja, eksploatacja w Szczyrku w 2016 roku. Wspólna publikacja (*Wpływ masowego udziału powietrza w parze wodnej na parametry przepływowe w modelowym pęczku rurowym skraplacza*) została opublikowana jako rozdział w monografii.
- Recenzje publikacji w czasopismach naukowych (tabela 2)

Tabela 2. Spis czasopism dla których wykonałam recenzje

Czasopismo	Liczba recenzji	punkty	IF
International Journal of Heat and Mass Transfer	1	140	5.584



International Journal of Thermal Sciences	3	140	3.476
International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow	2	100	2.871
Inverse Problems in Science and Engineering	5	40	1.314
Computer Modeling in Engineering & Sciences	1	40	0.805
Archives of Thermodynamics	1	40	0

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

- Promotor pomocniczy doktoranta mgra Wojciecha Judta. Praca doktorska nt: „Analiza procesu wymiany ciepła uzyskiwanego ze spalania paliw stałych w warunkach nieruchomego złoża” realizowana jest na Politechnice Poznańskiej.
- Współautor zbioru zadań (Mechanika płynów. Zbiór zadań z rozwiązaniami pod redakcją Michała Ciałkowskiego).
- Nagroda Rektora za osiągnięcia naukowe (dwukrotnie).
- Referaty na konferencjach krajowych (3) i międzynarodowych (3, wystąpienia w języku angielskim).
- Senator Politechniki Poznańskiej na kadencję 2020 – 2024.
- Członek Senackiej Komisji ds. Budżetu i Finansów.
- Koordynator ds. eLearningu na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki dla kierunku Energetyka Przemysłowa i Odnawialna.
- Zastępca Przewodniczącego Wydziałowej Komisji Wyborczej.
- Członek Uczelnianej Komisji Dyscyplinarnej dla Studentów na kadencję 2020 – 2024.
- Członek zespołu przygotowującego nowy kierunek studiów I stopnia Energetyka Przemysłowa i Odnawialna na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej.
- Opiekun laboratorium Termodynamiki Technicznej.
- Opracowanie materiałów dydaktycznych do przedmiotów: Metody numeryczne (wykład i ćwiczenia), Podstawy energetyki cieplnej (wykład i ćwiczenia, wspólnie z innym prowadzącym) oraz Wybrane zagadnienia wymiany ciepła (wykład i ćwiczenia, wspólnie z innym prowadzącym).

Wykaz prowadzonych przeze mnie zajęć od momentu zatrudnienia na Politechnice Poznańskiej:

Lp.	Rodzaj zajęć dydaktycznych	Typ zajęć:	Typ studiów: 1-2 stopień/Stacjonarne (S)-Niestacjonarne(NS)	Liczba godzin
1	Mechanika płynów	ćwiczenia	1/S	15
			1/NS	9
		laboratoria	1/S	15
2	Mechanika płynów II	ćwiczenia	2/S	15
			2/NS	9
3	Termodynamika techniczna	ćwiczenia	1/S	15



			1/NS	9
		laboratoria	1/S	15
4	Termodynamika techniczna II	ćwiczenia	2/S	15
			2/NS	9
5	Elementy termodynamiki i mechaniki płynów	ćwiczenia	1/S	15
			1NS	9
6	Podstawy energetyki cieplnej (wspólnie z innym prowadzącym)	wykład	1/S	30
			1/NS	18
		ćwiczenia	1/S	15
			1/NS	9
7	Metody numeryczne	wykład	2/S	15
			2/NS	9
		ćwiczenia	2/S	15
			2/NS	9
8	Wybrane zagadnienia wymiany ciepła (wspólnie z innym prowadzącym)	wykład	2/S	15
		ćwiczenia	2/S	15
9	Elementy teorii termodynamiki technicznej, łączności i funkcjonowania człowieka w lotnictwie	ćwiczenia	1/S	15

**7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.**

- Trzymiesięczny staż przemysłowy w Dziale Badań i Konstrukcji SECO/WARWICK  
Podczas stażu realizowano tematy dotyczące przepływu ciepła w elementach ulepszonych w piecach do obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej.
- Trzymiesięczny staż przemysłowy w firmie Filen. Zagadnienia analizowane podczas stażu obejmowały:
  - matematyczny opis geometrii krzywek,
  - analizy przepływu ciepła w elementach silnika tłokowego,
  - analizy przepływu ciepła w ściankach zgazowarki.

**Oprócz prac opisanych w cyklu publikacji zamieszczonych w punkcie 4 autoreferatu, habilitant realizował następujące tematy badawcze:**

**7.1. Analiza wpływu gazów inertnych na warunki kondensacji w skraplaczach energetycznych**

Opracowałam modele obliczeniowe służące do analizy kondensacji pary z udziałem powietrza w pęczku rurowym skraplacza energetycznego. Powietrze jest gazem inertnym (nie skraplającym się) pogarszającym warunki kondensacji pary. Modele te bazowały na teorii Nusselta. Zastosowałam w nich prawo Daltona oraz metodę Wilkiego. Uwzględniłam zależność lepkości kinematycznej od temperatury. Modele te umożliwiły wyznaczenie spadku ciśnienia statycznego, temperatury, prędkości mieszaniny pary i powietrza w modelowym pęczku rurowym. Wyznaczyłam ciśnienie składnikowe pary wodnej oraz powietrza w kolejnych rzędach rur. Analizowałam również zmiany liczby Reynoldsa, liczby Nusselta, ciepła skraplania pary wodnej oraz współczynnika przejmowania ciepła w kolejnych rzędach rur skraplacza. Programy napisałam w języku Fortran.

## 7.2. Analiza rozkładu temperatury w rurze z osadem mineralnym z zastosowaniem rozwiązania zagadnienia odwrotnego dla równania przewodnictwa ciepła

Badania obejmowały wyznaczenie rozkładów temperatury w rurze wymiennika ciepła kotła parowego. Analizowałam nagrzewanie rury z kamieniem kotłowym oraz bez osadu. Opracowałam model obliczeniowy pozwalający na rozwiązanie zagadnienia odwrotnego typu geometrycznego. Wyznaczyłam grubości kamienia kotłowego w oparciu o pomiar temperatury w rurze oraz gęstości strumienia ciepła na ścianie zewnętrznej rury wymiennika ciepła. Analizowałam wrażliwość uzyskiwanych rozkładów temperatury w rurze i w kamieniu. W obliczeniach uwzględniłam błąd pomiaru temperatury, niedokładność zabudowy termoelementu oraz błąd pomiaru gęstości strumienia ciepła na ścianie zewnętrznej rury. Wyznaczyłam grubość kamienia kotłowego w zależności od jego właściwości oraz obciążenia cieplnego elementu wymiennika. Zaproponowany model obliczeniowy odpowiada również zagadnieniu nieliniowemu, w którym uwzględnia się zmianę współczynnika przewodzenia ciepła w zależności od temperatury.

## 7.3. Model niestacjonarnego przepływu ciepła w korpusie silnika z wolnym tłokiem

W ramach zlecenia [0712/PRJG/5207] uczestniczyłam w badaniach dotyczących opracowania niestacjonarnego modelu przepływu ciepła w ścianie cylindrycznej silnika z izolowaną komorą spalania. Model ten dedykowany jest dla nowego typu silnika z izolowaną komorą spalania i posłużył do zaprojektowania oraz optymalizacji geometrii nowego typu silnika agregatowego.

Model obliczeniowy został napisany w środowisku FreeFem++ o otwartym kodzie bazującym na metodzie elementu skończonego. W modelu rozwiązywano równania różniczkowe opisujące przepływ ciepła w postaci wariacyjnej z niestacjonarnymi warunkami brzegowymi. Uwzględniono zmienność współczynników przewodzenia ciepła materiałów z których wykonane są elementy korpusu silnika w funkcji temperatury. Model umożliwia symulację niestacjonarnych pól temperatury występujących podczas nagrzewania korpusu silnika oraz jego ustabilizowanej pracy dla różnych geometrii korpusu z możliwością uwzględnienia izolacji komory spalania. W modelu uwzględniono ruch tłoka, zmienność temperatury gazu w cylindrze oraz zmienność współczynnika przejmowania ciepła od gazów do ścianki wewnętrznej korpusu w cyklu pracy silnika.

## 7.4. Badania dotyczące uszczelnień bezdotykowych

- Analiza przenoszenia błędów pomiarowych przy wyznaczaniu strumienia masy na stanowisku do badań uszczelnień labiryntowych
- Obliczenia wariantowe uszczelnienia szczelinowego tłok-cylinder (zlecenie 0712/PRJG/5205)
- Obliczenia wariantowe uszczelnienia rowkowego tłok-cylinder (zlecenie 0712/PRJG/5206)

### Przed uzyskaniem stopnia doktora:

- Miesięczny staż przemysłowy w Elektrociepłowni Karolin w ramach projektu *Wielkopolski inżynier w Europejskiej przestrzeni badawczej*
- Tygodniowy staż w Veolia Environnement, Francja

### Tabela 2 Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze nie wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Rodzaj dorobku		Łącznie	Liczba punktów MNiSW
1	Monografia	0	0
2	Rozdziały w monografiach	3	40
3	Publikacje naukowe w czasopismach	0	0



	indeksowanych w JCR (lista A MNiSW)		
3	Publikacje naukowe w czasopiśmie indeksowanych w bazie Web of Science (lista B MNiSW)	3	39 *120
4	Publikacje naukowe w czasopiśmie <b>nie</b> indeksowanych w bazie Web of Science (lista B MNiSW)	4	25
5	Publikacje z konferencji naukowych indeksowane w Web of Science	2	-
6	Wystąpienia na konferencjach krajowych	3	-
7	Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych	3	-
8	Recenzje w czasopiśmie	13	-
9	Udział w projektach zleconych	3	-
10	Udział w Działalność Statutowa	8	-
11	Staż przemysłowe	4	-

\* punktacja według aktualnej listy MNiSW

Magda Joachimiak