

Autoreferat

1. Imię i Nazwisko

Bogusław Białko

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:

- Magister inżynier – Wydział Mechaniczno-Energetyczny Politechniki Wrocławskiej, 24 czerwca 1994 r.
- Doktor inżynier – nadany uchwałą Rady Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej dnia 29 czerwca 2000 roku, na podstawie rozprawy zatytułowanej: „Optymalizacja składu mieszanin ziębników niedestrukcyjnych dla ozonu w systemach realizujących obiegi lewobieżne”.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 02/1999 – obecnie – adiunkt na Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem stanowiącym podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego jest praca opublikowana w całości w postaci monografii pt.: „Termodynamiczne aspekty stosowalności mieszaniny węglowodorów nasyconych do realizacji obiegów lewobieżnych” (100% udziału własnego).

b) (autor, tytuł publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)

Bogusław Białko, Termodynamiczne aspekty stosowalności mieszaniny węglowodorów nasyconych do realizacji obiegów lewobieżnych, 2019, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, recenzenci: dr hab. inż. Piotr Szulc – Politechnika Wroclawska, dr hab. inż. Krzysztof Dutkowski, prof. nzw. PK – Politechnika Koszalińska

c) omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Technika chłodnicza stara się sprostać obowiązującym wymaganiom wynikającym z konieczności oszczędzania energii i ochrony środowiska naturalnego, sięga po źródła energii odnawialnej, adaptuje nowe technologie, nośniki ciepła, miniaturyzację. Wszystko to ma poprawić efektywność urządzeń, zmniejszyć energochłonność, obniżyć koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, zwiększyć komfort życia. Pojawiają się zupełnie nowe rozwiązania procesowe i czynniki chłodnicze, ale również te kiedyś odrzucone zaczynają ponownie cieszyć



się zainteresowaniem. W zestawieniu z obecnymi trendami okazują się bowiem nowatorskie, ekologicznie uzasadnione i ekonomicznie opłacalne. Projektanci i konstruktorzy są zobligowani już podczas dokonywania obliczeń wstępnych i założeń koncepcyjnych sięgać po rozwiązania optymalne, projektować obiegi termodynamiczne, które w określonych warunkach zagwarantują maksymalizację efektów.

Względy ekologiczne kierują jednoznacznie uwagę badaczy systemów cieplnych w stronę naturalnych czynników chłodniczych, których największą zaletą jest brak negatywnego oddziaływania na otoczenie. W wielu ośrodkach naukowych analizuje się możliwość ponownego zastosowania czynników pochodzenia naturalnego, znanych od dawna, lecz wypartych w latach 60. ubiegłego stulecia przez czynniki syntetyczne^{1,2}. Okazało się, że takie ograniczanie wpływu działalności człowieka na klimat oprócz zmniejszenia emisji szkodliwych substancji może być również związane z oszczędzaniem energii napędowej systemów energetycznych, optymalizowaniem konstrukcji, modyfikowaniem technologii wytwarzania i prowadzić do zwiększania efektywności regulacji i automatyzacji usprawniającej eksploatację. W ostatnich latach pojawiają się rozwiązania proponujące zastosowanie dobrze znanych czynników naturalnych i ich mieszanin³. Największym zainteresowaniem cieszą się propan, izobutan, n-butan, ich mieszaniny oraz pochodne⁴. Stanu wiedzy na temat pełnego wykorzystania specyficznych właściwości termofizycznych takich substancji w typowych obiegach chłodniczych nie można jednak uznać za zadowalający⁵.

Z tego powodu głównym osiągnięciem opisanym w monografii było wskazanie na możliwości znacznego zwiększenia zastosowania czynników naturalnych, a zwłaszcza ich mieszanin, w ziębiarkach i pompach ciepła. Koncentrując się na skutkach cieplnych i termodynamicznych wykorzystania węglowodorów nasyconych w technice chłodniczej, zwróciłem uwagę na szczególną właściwość węglowodorów nasyconych, jaką jest nieizotermiczność przemian fazowych ich mieszanin zeotropowych i wynikające stąd implikacje teoretyczne, takie jak dobór i analiza termodynamiczna porównawczego obiegu lewobieźnego do minimalizacji strat egzetycznych w projektowaniu konstrukcyjno-eksploatacyjnym wymienników ciepła. Na podstawie uogólnionego modelu matematycznego przeanalizowałem zasady doboru parametrów termodynamicznych czynników obiegowych do realizacji założonych wymagań cieplnych oraz wpływ rodzaju czynnika na efektywność energetyczną obiegu lewobieźnego. Na tej podstawie zaproponowałem mieszaniny wieloskładnikowe w charakterze czynnika roboczego, których przydatność zweryfikowałem eksperymentalnie.

¹ Abas N., Kalair A. R., Khan N., Haider A., Saleem Z., Saleem M. S., Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 2018, PP 557-569

² Antunes A. H. P., Filho E. P. B., Experimental investigation on the performance and global environmental impact of a refrigeration system retrofitted with alternative refrigerants, *International Journal of Refrigeration*, Volume 70, 2016, Pages 119-127

³ Dhavale S., Deshmukh M., Performance Comparison of Hydrocarbon Refrigerant as Isobutane R600a and Propane R290 in Domestic Refrigerator as Alternative Refrigerants to R134a, *Invention Journal of Research Technology in Engineering & Management*, Volume 1, Issue 3, 2016, PP 20-23

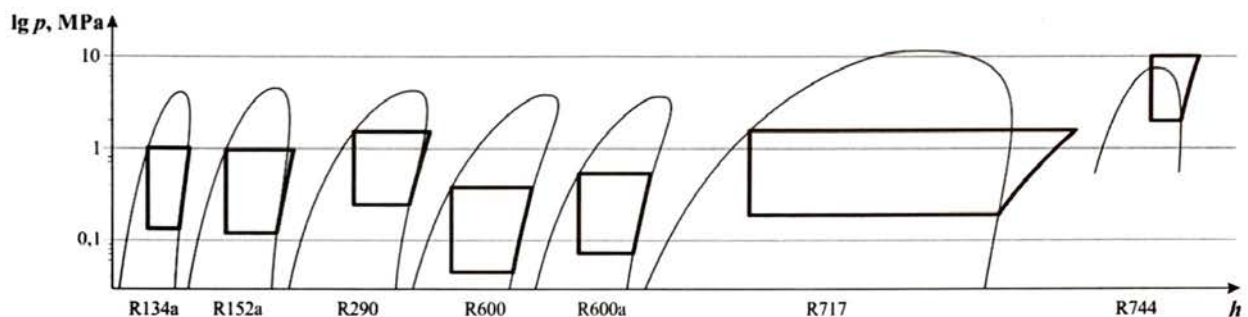
⁴ Domanski P. A., Brignoli R., Brown J. S., Kazakov A. F., McLinden M. O., Low-GWP refrigerants for medium and high-pressure applications, *International Journal of Refrigeration*, Volume 84, 2017, Pages 198-209

⁵ Harby K., Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 73, 2017, Pages 1247-1264, ISSN 1364-0321,



W rozdziale 3, wychodząc od idealnego obiegu Carnota, opisałem i oceniłem obiegi porównawcze sprężarkowych systemów lewobieżnych realizowanych z udziałem czynników naturalnych. Wszystkie obiegi w urządzeniach rzeczywistych są obiegami nieodwracalnymi. Powstaje zatem podstawowy problem opisu obiegu rzeczywistego oraz określenia stopnia jego nieodwracalności, czyli odstępstw od obiegu idealnego. Dokonuje się tego przez porównanie przyjętego obiegu z wybranym obiegiem odwracalnym lub innym nieodwracalnym obiegiem porównawczym, równoważnym pod względem efektu chłodniczego⁶. Sprawą otwartą pozostaje dobór obiegu porównawczego.

Na rys. 1 przedstawiłem obiegi Lindego realizowane za pomocą różnych czynników chłodniczych w temperaturze odparowania $T_0 = 253,15$ K i temperaturze skraplania $T_k = 313,15$ K umożliwiające porównanie przydatności rozważanych czynników do realizacji obiegu suchego Lindego.



Rys. 1. Obiegi Lindego we współrzędnych $\lg p$ - h realizowane za pomocą różnych czynników chłodniczych w tym samym zakresie temperatury 253,15–313,15 K

Analiza porównawcza obiegów przedstawionych na rys. 1 wskazuje na różne ciśnienie, pod którym przebiegają przemiany fazowe (wymagany spręż) oraz ciepło tych przemian. Największym wymaganym sprężem charakteryzują się czynniki R152a, R600 i R717, a największą wartością ciepła skraplania i parowania czynniki R717. Dzięki temu porównaniu jasno wykazałem, że można uzasadnić wykorzystanie konkretnego czynnika w zależności od różnicy między ciśnieniem skraplania a ciśnieniem krytycznym, gdyż ciśnienie skraplania bliskie ciśnieniu krytycznemu zmniejsza wartość właściwego ciepła skraplania i przy braku przechłodzenia cieczy za skraplaczem wpływa na zmniejszenie współczynnika efektywności chłodniczej, tak jak dla czynnika R290. Znajduje to również potwierdzenie w wartościach charakterystycznych obiegu przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie przeliczeń punktów charakterystycznych obiegów teoretycznych Lindego, dla wybranych czynników chłodniczych w zakresie temperatur 253, 15–313,15 K; $COP_c = 5,06$

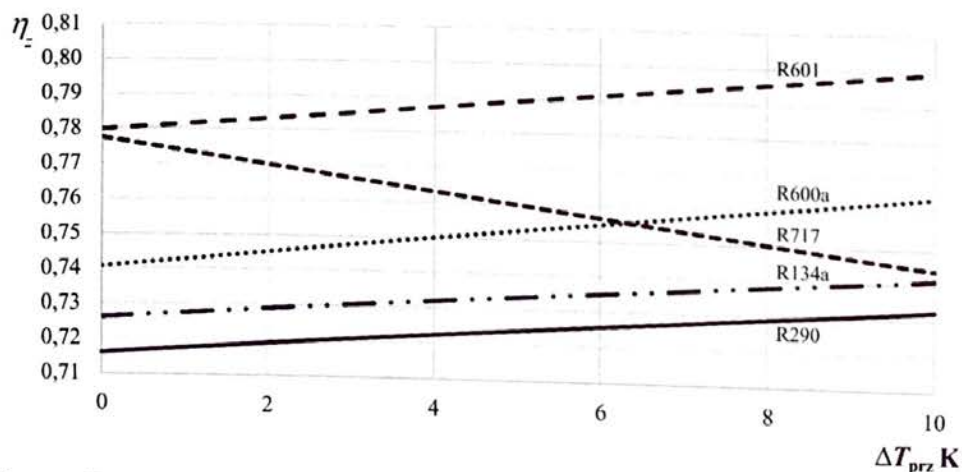
Czynnik	h_1	h_2	h_3	q_0	l	p_0	p_k	p_k/p_0	v_1	η_E
	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	MPa	MPa	–	m ³ /kg	–
R290	552,1	633,2	307,1	245,0	81,1	0,245	1,369	5,6	0,1817	0,716
R600	557,0	637,7	296,8	260,2	80,7	0,045	0,378	8,4	0,7824	0,764
R600a	527,6	601,6	296,3	231,3	74,0	0,072	0,531	7,3	0,4834	0,741
R717	1580,8	1900,1	533,8	1047,0	319,3	0,190	1,555	8,2	0,6237	0,777

⁶ Królicki Z.: Termodynamiczne podstawy obniżania temperatury, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006

Z porównania tych danych wynika, że czynniki o największym wymaganym sprężu (R717 i R600) charakteryzują się największą wartością stopnia doskonałości obiegu η_z , co świadczy o dobrym dopasowaniu parametrów tych czynników do wybranego zakresu temperatury. Przeprowadziłem podobną analizę dla innych zakresów temperatur parowania i skraplania, określając w ten sposób zasadność wykorzystania poszczególnych czynników w odpowiednich obszarach.

Poddając szczegółowej analizie teoretycznej i eksperymentalnej proces doziębienia z uwzględnieniem stopnia przegrzania pary suchej na wlocie do sprężarki zauważyłem, że obniżenie tym sposobem temperatury cieczy opuszczającej skraplacz ma znaczący wpływ na efektywność obiegu ziębiarki. Wykorzystałem do tego następujące założenia: obieg wyjściowy (bez doziębienia) jest realizowany jako obieg suchy Lindego; sprężanie jest izentropowe; dławienie jest izentalpowe; nie występują spadki ciśnienia na zaworach sprężarki, w rurociągach i wymiennikach ciepła; proces doziębienia jest realizowany jako idealny (zmniejszenie entalpii cieczy jest równe przyrostowi entalpii pary przegrzanej); obniżenie temperatury cieczy za skraplaczem wynosi 10 K. Przeanalizowałem obiegi realizowane z pomocą wybranych czynników naturalnych i dla porównania – czynnika R134a. Obliczenia oparłem na obiegu, w którym temperatura kondensacji T_k była zawsze wyższa od temperatury odparowania T_0 o 50 K. Celem takiego zabiegu było określenie parametrów pracy w możliwie szerokim zakresie temperatury badanych czynników z uwzględnieniem kształtu krzywej nasycenia oraz przebiegu linii stałej entropii. Dla węglowodorów, w których kształt krzywej znacznie zmienia się wraz ze wzrostem ciśnienia, zastosowanie doziębienia nie jest modyfikacją oczywistą.

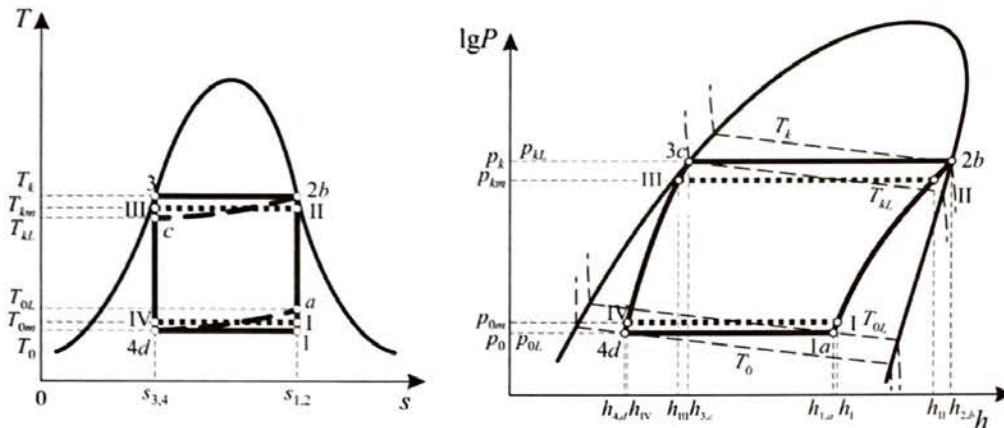
Przeanalizowałem również wpływ procesu doziębienia na sprawność egzergetyczną obiegu, określając wartość przegrzania pary czynnika chłodniczego na ssaniu sprężarki. Wartość tę obliczyłem na podstawie bilansu ciepła wymienianego w doziębiaczu, założywszy, że przyrost entalpii pary czynnika jest równy zmniejszeniu entalpii cieczy czynnika opuszczającej skraplacz (rys. 2). W wyniku tej analizy również potwierdziłem pozytywny wpływ zastosowania doziębiacza na efektywność obiegu ziębiarki w systemach, w których zastosowano węglowodory jako czynniki obiegowe.



Rys. 2. Sprawność egzergetyczna różnych czynników z zastosowaniem doziębienia w $T_k = 313,15$ K, $T_0 = 253,15$ K oraz doziębienia cieczy czynnika chłodniczego o 0–7 K przekładających się na przegrzanie pary przed sprężarką ΔT_{prz} o 0–10 K

W roztworze wieloskładnikowym, a zwłaszcza roztworze zeotropowym, przemiany fazowe parowania i skraplania są izobaryczne, ale nie izotermiczne. W zależności od właściwości mieszaniny przemiany mogą przebiegać w zakresie kilkunastu stopni. Dla takich obiegów ziębienia podstawowym obiegiem porównawczym powinien być obieg odwracalny o zmiennej temperaturze źródeł, czyli np. obieg Lorenza.

Poprzez analizę teoretyczną obiegu Lorenza wykazałem, że w takim obiegu należy dążyć nie tylko do maksymalnej nieizotermiczności procesów, ale również, aby linie równowagi ciecz–para odpowiadające przemianom w obu wymiennikach były równoległe (rys. 3).



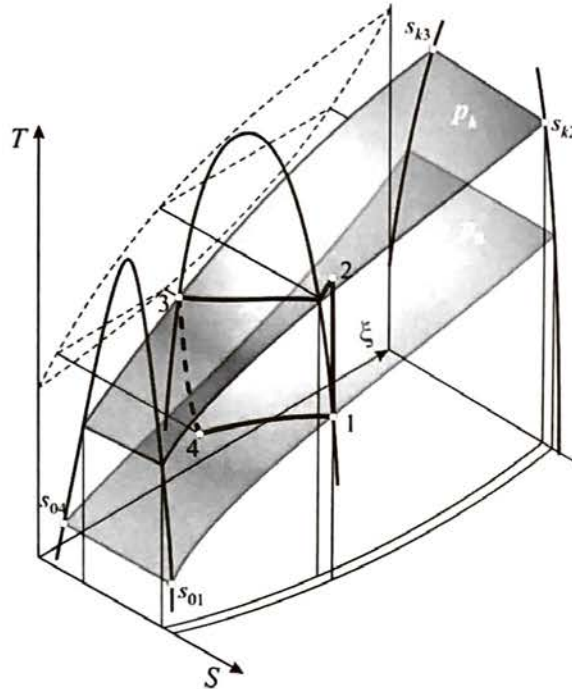
Rys. 3. Zestawienie obiegów Carnota (1–2–3–4), Lorenza (a–b–c–d) oraz zastępczego obiegu Carnota (I–II–III–IV) we współrzędnych $T-s$ i $\lg P-h$

Skład mieszaniny zeotropowej, jaką najczęściej tworzą czynniki naturalne, wpływa na nieizotermiczność przemian fazowych, a tym samym na zmianę wskaźnika efektywności całego układu. Powoduje to zmiany w zużyciu energii napędowej przez system lewobieżny i może stanowić kryterium doboru składu mieszaniny pod względem minimalnego zużycia energii napędowej przez system ziębienia.

Przedstawiając tok obliczeniowy w monografii wykazałem, że im mniejszy jest średni przyrost temperatury $T_{km} - T_{0m}$ w obiegu, tym większy współczynnik wydajności chłodniczej. Małe przyrosty temperatury występują wszędzie tam, gdzie istnieje nieizotermiczność przemian fazowych, charakterystyczna dla czynników zeotropowych. Posługując się uśrednionymi wartościami temperatury, wyniki modelowania przenieśliem na obieg Lindego. W ten sposób powstała wersja obiegu Lindego z nieizotermicznymi przemianami w parowaczu i skraplaczu, w której dla pełnej analizy wprowadziłem dodatkowy skład roztworu ξ . Taki obieg przedstawiłem na wykresie $T-S-\xi$ (rys. 4).

Szare powierzchnie na rys. 4 odpowiadające ciśnieniu kondensacji p_k oraz odparowania p_0 zmieniają swój kształt i położenie w zależności od składu mieszaniny. Odzworowuje to poziom nieizotermiczności przemian fazowych oraz pokazuje różnice wartości w punkcie nasycenia pod stałym ciśnieniem (np. różnica entropii między punktami s_{k2} a s_{k3} lub s_{01} a s_{02} na rys. 4), reprezentująca maksymalne wartości ciepła dostarczanego do parowaczu oraz odbieranego ze skraplacza. Dobór rodzaju i stężeń składników mieszaniny pozwala dopasować się do warunków wymiany ciepła w wymiennikach i uzyskać różnicę temperatury zapewniającą możliwie małe straty egzergetyczne systemu. Można przeanalizować wpływ strat dławienia

izentalpowego na efektywność oraz wymagane przegrzanie pary czynnika w celu uniknięcia procesu sprężania pary mokrej.



Rys. 4. Obieg Lindego we współrzędnych T - S - ξ

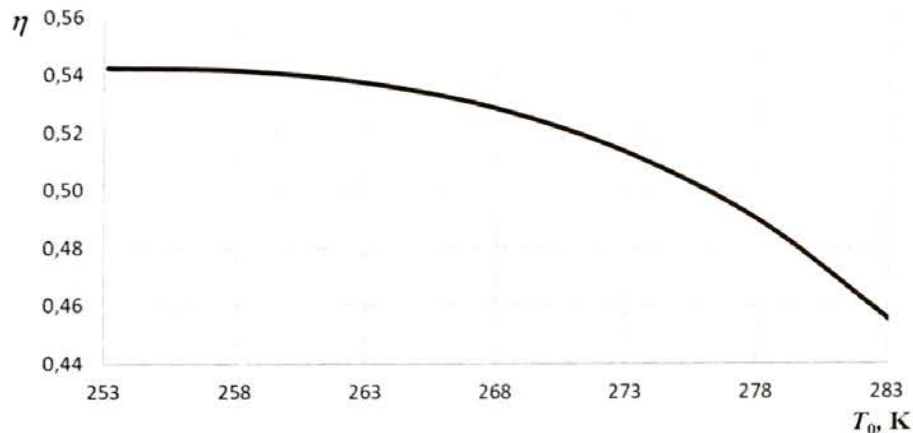
W rozdziale 6 monografii skoncentrowałem się na prawidłowości wyboru obiegów porównawczych. Takiej oceny można dokonać na podstawie analizy egzergicznej. Jak wykazuje wielu autorów^{7, 8}, pojęcie egzergii jest szczególnie przydatne do racjonalnej oceny przydatności energetycznej źródła ciepła, ale także czynnika chłodniczego. Na podstawie modelu matematycznego obliczyłem wartości sprawności egzergicznej obiegu przegrzanego z dochłodzeniem w zależności od temperatury skraplania T_k dla różnych wartości temperatury parowania T_0 . Największą wrażliwość na różnice temperatury T_k i T_0 wykazuje obieg realizowany w najniższej temperaturze $T_0 = 253,15$ K, gdzie wartość sprawności egzergicznej spada o 21,5%, podczas gdy dla $T_0 = 283,15$ K sprawność egzergiczna zmniejsza się o 16,9%. Jest to związane z rosnącą różnicą temperatury pracy obiegu. Generalnie wszystkie analizowane przypadki wykazują szybki spadek sprawności egzergicznej ze wzrostem różnicy temperatury obiegu. Korzystne zatem byłoby dobieranie różnicy temperatury wymienników ciepła zależnie od wielkości przedziału temperatury pracy urządzenia chłodniczego. Im mniejszy jest przedział temperatury pracy obiegu, tym mniejsze powinny być różnice temperatury w wymiennikach. Procesy wymiany ciepła w wymiennikach odbywają się podczas przemian politropowych ($p = \text{const}$ i $T = \text{const}$). Zachowanie równowagi termodynamicznej podczas całego procesu wymaga jednak uwzględnienia zmiany temperatury czynnika roboczego. Nie do pominięcia są też spadki temperatury czynników pośredniczących podczas przemian w wymiennikach spowodowane spadkami ciśnienia. Wpływ zmian wartości temperatury parowania i skraplania na efektywność COP i wartości egzergii obiegu

⁷ Joybari M. M., Hatamipour M. S., Rahimi A., Modarres F. G., Exergy analysis and optimization of R600a as a replacement of R134a in a domestic refrigerator system, International Journal of Refrigeration, Vol. 36, 2013, PP 1233-1242

⁸ Szargut J., Petela R., Egzergia, WNT, Warszawa, 1968

porównawczego jest znany⁹. Wpływ zmian tych temperatur (nieizotermiczność przemian fazowych wewnątrz wymienników) nie jest już tak oczywisty¹⁰.

Wykorzystując model obliczeniowy uwzględniający zmianę temperatury czynnika podczas przemian w wymiennikach obliczyłem wartość efektywności egzergetycznej ziębiarki pracującej z mieszaniną R290/R600a w stosunku wagowym 45/55 jako czynnikiem obiegowym dla temperatury skraplania $T_k = 313,15$ K, dochłodzenia $\Delta T_{\text{doch}} = 5$ K, przegrzania pary przed sprężarką $\Delta T_{\text{pg}} = 7$ K oraz różnych wartości temperatury odparowania (rys. 5).



Rys. 5. Zależność sprawności egzergetycznej obiegu R290/R600a o stosunku wagowym 45/55 od temperatury odparowania; $T_k = 313,15$ K, dochłodzenie $\Delta T_{\text{doch}} = 5$ K, przegrzanie pary przed sprężarką $\Delta T_{\text{pg}} = 7$ K

Bardzo ważnym wnioskiem, jaki wyciągnąłem z analizy przebiegu krzywej zmian sprawności egzergetycznej obiegu z użyciem mieszaniny R290/R600a dla różnych wartości temperatury odparowania był fakt, że wraz ze wzrostem temperatury odparowania maleje sprawność egzergetyczna. Ten zaskakujący kierunek zmian sprawności znajduje wytłumaczenie w tym, że wraz ze wzrostem temperatury odparowania zmniejsza się nieizotermiczność przemian fazowych i równocześnie zmniejsza się sprawność egzergetyczna obiegu.

W wyniku modelowania obiegów teoretycznych oraz opracowania modelu matematycznego właściwości fizycznych i termodynamicznych mieszaniny propan–izobutan porównałem współczynniki wydajności chłodniczej urządzeń z użyciem czynników azeo- i zeotropowych (obiegi porównawcze Carnota i Lorenza). Wykazałem, że zastosowanie mieszanin ziębników jest korzystne nawet w przypadku niewielkich odchyłek od izotermiczności przemiany fazowej. Na przykład dla temperatury odparowania $T_0 = 268,15$ K i kondensacji $T_k = 333,15$ K, poślizg temperaturowy wynoszący zaledwie 4 K umożliwia wzrost efektywności o 7%, a dla temperatur $T_0 = 253,15$ K i $T_k = 303,15$ K ten sam poślizg przekłada się na niemal 11% wzrost efektywności. Potwierdziłem zatem ponownie, że dobór odpowiedniego składu mieszaniny ziębników, czyli osiągnięcie odpowiedniego poślizgu temperaturowego wpływającego na wzrost efektywności jest ściśle związane z zakresem temperatury, w jakiej pracuje urządzenie chłodnicze.

⁹Bohdal T., Harun H., Czap M.: Urządzenia chłodnicze sprężarkowe parowe, WNT, Warszawa 2003

¹⁰ Maczek K., Wojtas K., Niezgoda B.: Badania proekologicznych ziębników i mieszanin w obiegach lewobieżnych, materiały XVI Zjazdu Termodynamicznych, Koszalin–Kołobrzeg 1996, t. 2, s. 89

Wykorzystując algorytm obliczeniowy do określania właściwości termodynamicznych mieszanin zastosowałem metodę wyznaczania rzeczywistych charakterystyk mieszanin wieloskładnikowych w procesach przebiegających ze zmianą ich stanu skupienia¹¹. Umożliwiło to określenie charakterystyk rozkładu temperatury wzdłuż parowacza w trakcie izobarycznego wrzenia mieszaniny. Mieszaniny porównywano zgodnie z teorią stanów odpowiadających sobie dla ciśnienia zredukowanego czynnika w parowaczu, co wskazało na istnienie pewnego optymalnego składu (w obiegu Lorenza) w zakresie składu mieszaniny R290/R600a od 40/60 do 60/40. Po przeprowadzeniu dokładniejszej analizy okazało się, że najbardziej zbliżona do mieszaniny idealnej jest mieszanina o stosunku molowym R290/R600a 46/54. Zapewnia to uzyskiwanie w obiegach rzeczywistych efektywności energetycznej bliskiej założonej, a zmiany temperatury towarzyszące zmianom stanu skupienia są zbliżone do zmian charakterystycznych dla mieszanin idealnych. Podobną analizę przeprowadziłem dla mieszaniny, w której izobutan został zastąpiony n-butanem, węglowodorem o tym samym składzie chemicznym, lecz innej budowie cząsteczki, normalnej temperaturze wrzenia wyższej o 11,26 K, temperaturze krytycznej wyższej o 17,3 K oraz ciśnieniu krytycznym wyższym o 0,167 MPa. W tym przypadku najbardziej zbliżoną do mieszaniny idealnej okazała się mieszanina R290/R600 o stosunku molowym 51/49.

Następnie przeprowadziłem serię badań eksperymentalnych, na zbudowanym przeze mnie stanowisku, których celem była doświadczalna weryfikacja sprawności energetycznej urządzenia chłodniczego wypełnionego czynnikiem roboczym – mieszaniną propan–izobutan i propan–n-butan. Jako kryterium oceny przyjąłem minimalną wartość poboru energii napędowej dla ustalonej wydajności ziębnienia. Badania prowadziłem zgodnie z teorią planowania doświadczeń, w której wybierałem zmienne od siebie niezależne, wpływające na wynik pomiaru. Po ustaleniu zakresu zmian ich wartości rozpoczynał się eksperyment. Na podstawie wyników badań, przeprowadziłem statystyczną ocenę istotności współczynników i adekwatności opracowanego równania regresji. Opisuje ono w sposób analityczny zużycie energii w ciągu doby przez badany system sprężarkowy. Następnie, w celu wyznaczenia optymalnego składu mieszaniny, równanie to zbadałem pod względem występowania ekstremum, a następnie wykazałem, że jest ono wartością minimalną funkcji, dającą największą wartość dobowego współczynnika *COP*. Obliczona wartość stężenia optymalnego dla mieszaniny R290/R600a wynosi $\xi_{opt} = 45,1/54,9$, a dla mieszaniny R290/R600 $\xi_{opt} = 51,4/48,6$. Zwróciłem uwagę na to, że mimo zbliżonego chemicznie składu obu badanych mieszanin stosunki składników odpowiadające maksymalnej wartości *COP* są znacząco różne.

W trakcie dalszych prac zająłem się węglowodorami nasyconymi w mieszaninach wieloskładnikowych. Zwolennicy stosowania mieszanin freonów¹² lub mieszanin czynników naturalnych w charakterze czynników chłodniczych¹³, zwracają uwagę na możliwość tworzenia mieszanin dwu- lub wieloskładnikowych o tak dobranym składzie, aby otrzymana mieszanina, spełniając wymagania ekologiczne, miała właściwości odpowiednie do projektowanego zakresu parametrów pracy. Niekiedy niewielki dodatek innego czynnika może diametralnie

¹¹ Schnotale J., Maczek K., Mieszaniny wieloskładnikowe jako ziębniki do realizacji obiegu lewobieżnego, XVII Zjazd Termodynamików, Materiały konferencyjne, Kraków 1999, tom 3, pp. 1197-1206

¹² Zhao Y., Gong M., Dong X., Zhang H., Guo H., Wu J., Prediction of ternary azeotropic refrigerants with a simple method, Fluid Phase Equilibria, Volume 425, 2016, Pages 72-83

¹³ Harby K., Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 73, 2017, Pages 1247-1264, ISSN 1364-0321

zmienić właściwości czynnika podstawowego, a tym samym zwiększyć jego atrakcyjność rynkową i termodynamiczną. Mieszanki tego typu mogą być szczególnie przydatne w nietypowym zakresie parametrów pracy czynników, np. gdy temperatura parowania jest bardzo niska lub temperatura kondensacji wysoka. Przykładem może być freon R401A, R402A czy R404A. W nielicznych pracach omawiających aspekty termodynamiczne stosowania mieszanin zwraca się uwagę na zagadnienia ciepłno-przepływowe i możliwość maksymalizacji wartości współczynnika COP obiegu rzeczywistego¹⁴. Potencjalne możliwości poprawy efektywności energetycznej obiegu ziębienia można osiągnąć dzięki zmniejszeniu nieodwracalności procesów wymiany ciepła w wymiennikach. Istnieją możliwości dopasowania profilu zmian temperatury czynnika zmieniającego stan skupienia w procesach nieizotermicznych do zmian zachodzących w wymiennikach. Wskazuje się również na fakt, że nie tylko lewobieżny obieg Lorenza będzie najbardziej odpowiedni jako obieg porównawczy dla urządzeń pracujących na wieloskładnikowych mieszaninach zeotropowych. Dla wielu mieszanin trójskładnikowych, szczególnie tych przeznaczonych do pracy w obszarze wysokiej temperatury odparowania, możliwe jest zastosowanie jako obiegu porównawczego klasycznego obiegu Lindego suchego lub z doziębieniem.

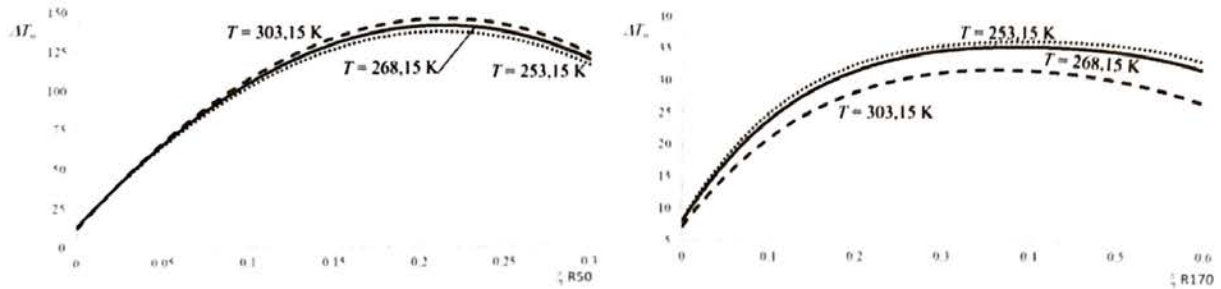
Dla lewobieżnych systemów wysokotemperaturowych można opracować mieszaninę, która będzie szczególnie przydatna w pompach ciepła o stosunkowo wysokiej temperaturze kondensacji $T_k > 80$ °C, pracujących w systemach odzysku ciepła odpadowego, w których rola pompy ciepła polega na zwiększeniu wartości egzergetycznej nośnika ciepła. W tym celu przeanalizowałem mieszaninę czynników chłodniczych R124, R142b i R600a o różnym składzie. Wskazałem na istotny wpływ udziału izobutanu na przebieg krzywych nasycenia oraz szerokość obszaru pary mokrej (różnicy entalpii między punktami nasycenia cieczy i pary pod stałym ciśnieniem), decydującej o wartości właściwego ciepła przemiany fazowej. Dobierając odpowiedni skład mieszaniny, a zwłaszcza zawartość izobutanu, można w szerokim zakresie zmieniać temperaturę kondensacji oraz różnicę entalpii między stanami nasycenia pod danym ciśnieniem. Na tej podstawie zaproponowałem mieszaninę czynników R124/R142b/R600a o składzie 10/70/20, która wykazuje właściwości mieszaniny azeotropowej i eksperymentalnie oceniłem jej przydatność, na przykładzie procesu podgrzania wody od 30 °C do 90 °C.

Zastosowanie mieszaniny węglowodorów w obiegach chłodniczych pozwala osiągać lepsze współczynniki efektywności chłodniczej w porównaniu z pojedynczymi składnikami. Nieizotermiczność przemiany fazowej umożliwia zwiększenie wartości współczynnika COP. Jest to możliwe również dzięki zastosowaniu więcej niż dwóch składników mieszaniny. Na podstawie wcześniejszych badań -wybrałem optymalny skład mieszaniny R290/R600a, a następnie wybrałem trzeci składnik do tej mieszaniny, tak, aby uzyskać wyższą niż w dwuskładnikowej mieszaninie różnicę temperatury zmiany fazy. Obszar badań ograniczyłem do węglowodorów, których bezpośrednie zastosowanie w chłodziarkach domowych jest niemożliwe z powodu zbyt niskiej normalnej temperatury wrzenia i parametrów punktu krytycznego. W temperaturach 253,15 K, 268,15 K oraz 303,15K sprawdziłem wartość nieizotermiczności przemiany fazowej po dodawaniu metanu i etanu. Wyniki tego modelowania dla mieszaniny R290/R600a/R50 (stałego stosunku składników R290/R600a

¹⁴ Jung D., Kim C., Song K., Park B., Testing of propane/isobutane mixture in domestic refrigerators, International Journal of Refrigeration, Volume 23, Issue 7, 2000, Pages 517-527



i zmiennej ilości R50) oraz mieszaniny R290/R600a/R170 (ponownie stałego stosunku składników R290/R600a i zmiennej ilości R170) przedstawia rys. 6.



Rys. 6. Zależność poślizgu temperaturowego przemian fazowych od udziału czynnika R50 i R170 mieszanin R290/R600a/R50 i R290/R600a/R170

Przeprowadzone na tej podstawie obliczenia wartości współczynnika COP suchego obiegu Lindego bez przegrzania pary czynnika przed sprężarką oraz bez przechłodzenia cieczy za skraplaczem, w temperaturze parowania $T_0 = 268,15$ K i temperaturze kondensacji $T_k = 333,15$ K, wskazują, że dodanie metanu lub etanu do mieszaniny R290/R600a nie jest w zasadzie pożądane, ponieważ powoduje zmniejszenie COP. Jednak dodanie niewielkiej ilości tych węglowodorów (mniej niż 5%) nie powinno zauważalnie zmniejszyć COP, ale znacznie zwiększyć poślizg temperaturowy podczas przemiany.

Wyniki obliczeń sprawdziłem eksperymentalnie. Jako czynniki chłodnicze zastosowałem: R600a (napęlnienie 43,3 g), R290/R600a/R50 w stosunku masowym 47/51/2 (napęlnienie 43,1 g) oraz R290/R600a/R170 w stosunku masowym 47/51/2 (napęlnienie 43,0 g). Do badań użyłem seryjnie produkowanej jednosprężarkowej chłodziarko-zamrażarki BSNF 8773 OX o pojemności komory niskotemperaturowej 94 dm³, komory wysokotemperaturowej 222 dm³, mocy znamionowej urządzenia 150 W i napęlnieniu nominalnym czynnikiem wynoszącym 43 g. Jako wypełnienie komór zastosowałem pakiety testowe symulujące właściwości termodynamiczne mięsa wołowego oraz umożliwiające rejestrację temperatury w całej objętości badanego urządzenia. W kontrolowanej temperaturze otoczenia wynoszącej 293 K urządzenie napęlnione mieszaniną R290/R600a/R50 o stosunku masowym 47/51/2 oraz R290/R600a/R170 o stosunku masowym 47/51/2 osiągało stan ustalony po około 8 godzinach pracy. Dzięki tym badaniom mogę stwierdzić, że zastosowanie mieszaniny trzech węglowodorów jako czynnika chłodniczego powoduje zmianę sposobu pracy urządzenia. System regulacji temperatury częściej wyłącza sprężarkę, a także w inny sposób steruje zaworami regulującymi dopływ tego czynnika do elementu dławiącego.

Kolejne badania, przeprowadzone na innym stanowisku, polegały na sprawdzeniu, w jaki sposób praca i zużycie energii przez urządzenie chłodnicze zależy od wielkości napęlnienia chłodziarki. W tym celu użyłem seryjnie produkowanej jednosprężarkowej zamrażarki skrzyniowej TZ 171 o pojemności komory zamrażalniczej 170 dm³, mocy znamionowej 130 W i napęlnieniu nominalnym czynnikiem wynoszącym 120 g. Jako czynniki chłodnicze zastosowałem: R600a (napęlnienie 124,0 g) R290/R600a/R50 w stosunku masowym 47/51/2 (napęlnienie 124,1 g) oraz R290/R600a/R170 w stosunku masowym 47/51/2 (napęlnienie 124,0 g). System regulacji wyłącza urządzenie napęlnione czystym czynnikiem R600a w temperaturze 256 K i włącza po przekroczeniu 262 K, utrzymując średnią temperaturę w komorze 259 K. W przypadku urządzenia napęlnionego mieszaniną R290/R600a/R50 system

regulacji wyłącza urządzenie w temperaturze 253 K, a włącza w temperaturze 259 K, utrzymując średnią temperaturę na poziomie 256 K, a więc o 3 K niższą niż w przypadku użycia czystego izobutanu. Zauważyłem, że częstotliwość włączania i wyłączania sprężarki jest większa, co wskazuje na szybsze osiąganie zadanych temperatur dzięki zastosowaniu mieszaniny. W urządzeniu napełnionym mieszaniną R290/R600a/R170 system regulacji wyłącza zamrażarkę w temperaturze 251 K, a włącza w temperaturze 260 K, utrzymując średnią temperaturę 255 K, o 4 K niższą niż w przypadku użycia czystego izobutanu i o 1 K niższą niż dla mieszaniny R290/R600a/R50. Inna jest częstotliwość włączania i wyłączania sprężarki, a charakter działania systemu regulacji urządzenia napełnionego tą mieszaniną jest zbliżony do charakteru pracy urządzenia napełnionego czynnikiem R600a. Urządzenie osiąga zadane parametry po mniejszej liczbie włączeń sprężarki. Wynika z tego, że zastosowanie zaproponowanych przeze mnie mieszanin korzystnie wpływa na zmniejszenie energochłonności urządzenia.

W celu potwierdzenia tych wniosków zmierzyłem zużycie energii elektrycznej przez urządzenia pracujące z czystym czynnikiem R 600a oraz mieszaniną R290/R600a/R50 o składzie 47/51/2 w cyklu 92 godzin pracy. Pomiar wykazały, że zastosowanie mieszaniny R290/R600a/R50 w badanej chłodziarko-zamrażarce przynosi 13% oszczędności zużycia energii napędowej, a w przypadku badanej zamrażarki zużycie energii jest o 11% niższe.

Analizy, obliczenia oraz badania eksperymentalne urządzeń pracujących według obiegu lewobieżnego pokazały, że kluczowym zagadnieniem jest izotermiczność przemian fazowych w obiegu urządzenia. Proces odparowania i skraplania zachodzący w zmieniającej się temperaturze odpowiada realizacji obiegu Lorenza. W porównaniu do obiegu Carnota opartego na takich samych punktach charakterystycznych obiegu (temperaturze początku kondensacji oraz początku parowania) poprawę współczynnika efektywności można uzyskać dzięki zwiększeniu poślizgu temperaturowego przemian fazowych.

Zwiększenia poślizgu temperaturowego można dokonywać za pomocą odpowiedniego doboru składników czynnika obiegowego. Zastosowanie mieszanin, w których normalne temperatury wrzenia poszczególnych czynników znacznie różnią się od siebie (więcej niż o 30 K), umożliwia regulację różnicy temperatury nasycenia pary i cieczy pod tym samym ciśnieniem oraz na precyzyjne dopasowanie zakresu jej zmian do założonych wymagań termodynamicznych.

Zastosowanie mieszanin wieloskładnikowych daje również możliwość uzyskania niższej temperatury odparowania lub wyższej temperatury kondensacji w porównaniu do czynników jednorodnych z utrzymaniem mocy napędowej wymaganej do pracy urządzenia na tym samym lub nawet niższym poziomie. Przyczynia się to do znacznego zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych urządzeń. Nieizotermiczność procesów parowania i skraplania ogranicza również koszty eksploatacyjne systemów, w których zmiana parametrów pracy wymiennika ciepła (np. temperatury po stronie nośnika ciepła) powoduje konieczność przestawiania parametrów pracy urządzenia (np. ciśnienia kondensacji). Na podstawie przeprowadzonego modelowania wykazałem, że istnieje możliwość stosowania węglowodorów w mieszaninach wieloskładnikowych. Parametry termodynamiczne oraz bezpieczeństwo ekologiczne tych substancji stanowią dobrą alternatywę dla substancji syntetycznych.



5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Moja działalność naukowa obejmuje ponadto kilka zagadnień badawczych. Są one związane z procesami wykorzystywanymi w systemach energetycznych realizujących obiegi lewobieżne, w szczególności wymianą ciepła i masy w urządzeniach i elementach składowych tych systemów. Zaliczyć można do nich:

- a) wykorzystanie pomp ciepła i systemów ziębno-grzewczych w odzysku ciepła odpadowego procesów przemysłowych, do ogrzewania i klimatyzacji;
- b) wykorzystanie adsorpcji fizycznej i chemicznej w konstrukcji ziębiarek i pomp ciepła;
- c) systemy trigeneracji oparte na adsorpcji fizycznej i chemicznej;
- d) poprawa efektywności odbioru ciepła w sondach pionowych, wykorzystywanych w sprężarkowych pompach ciepła

a) wykorzystanie pomp ciepła i systemów ziębno-grzewczych w odzysku ciepła odpadowego procesów przemysłowych, do ogrzewania i klimatyzacji

Równolegle rozwijany kierunek badań, to odnawialne źródła energii i sposoby ich wykorzystania przy pomocy obiegów lewobieżnych, szczególnie pomp ciepła (zał. 4.II.A poz. 4, zał. 4.II.E poz. 16, 17, 18, 27), systemy utylizacji energii odpadowej (zał. 4.II.A poz. 5, zał. 4.II.E poz. 12, 19), absorpcyjne systemy ziębno-grzewcze (zał. 4.II.E poz. 34, 38) zasilane energią odpadową. Skoncentrowałem się na sposobie określania efektywności termodynamicznej systemów ziębno-grzewczych uwzględniających rzeczywiste parametry pracy (zał. 4.II.E poz. 21). Prace te zaowocowały opracowaniem koncepcji metody poprawy sprawności bloków energetycznych, przez zastosowanie skojarzonych systemów ziębno-grzewczych i pomp ciepła (zał. 4.II.E poz. 34). Szereg opracowanych indywidualnych rozwiązań technicznych systemów odzyskiwania ciepła odpadowego zostało wykorzystane przez zleceniodawców z przemysłu.

Wielokrotnie modyfikowałem i wykorzystywałem model oceny wartości współczynnika efektywności systemu utylizacyjnego do różnych typów instalacji (zał. 4.II.L poz. 27, 36).

Prowadziłem też prace badawcze i analityczne nad zastosowaniem i wykorzystaniem pomp ciepła do odzysku ciepła ze spalin odlotowych procesów przemysłowych (zał. 4.II.E poz. 38) i wykorzystaniem go do napędu systemów klimatyzacyjnych przeznaczonych do trudnych warunków środowiskowych (zał. 4.II.E poz. 31).

Wspólnie z dr inż. Bartoszem Zajączkowskim oraz prof. Zbigniewem Królickim zajmowałem się badaniem i analizą własności cieplnych mieszanin ziębników naturalnych oraz możliwościami ich zastosowania w wysokotemperaturowych sprężarkowych pompach ciepła. Rezultaty analizy zostały opublikowane w opracowaniu (zał. 4.II.E poz. 12). Wyniki zostały zaprezentowane na konferencji 12th IEA Heat Pump Conference, 15-18 maja 2017, Rotterdam, Holandia (zał. 4.II.L poz. 1).

Zaangażowałem się również w prace badawcze, w tematyce obiegów transkrytycznych pomp ciepła i systemów ziębno-grzewczych opartych na dwutlenku węgla i podtlenku azotu, co znalazło swoje odzwierciedlenie w pracach (zał. 4.II.E poz. 17, 27).



b) wykorzystanie adsorpcji fizycznej i chemicznej w konstrukcji ziębiarek i pomp ciepła

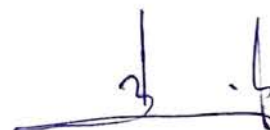
Kolejny obszar moich zainteresowań naukowych, to termodynamika procesów adsorpcji i desorpcji oraz możliwości wykorzystania tych procesów do obniżania temperatury. Szczególnie istotną wydaje się możliwość napędu takich systemów energią promieniowania słonecznego lub przemysłowym ciepłem odpadowym, co pozwala nawet na budowę wytwornic lodu (zał. 4.II.L poz. 22). Istnieją też duże możliwości wykorzystania procesów sorpcji w systemach klimatyzacyjnych (zał. 4.II.L poz. 14). Obok sorpcji fizycznej: wody, metanolu, etanolu na powierzchni silikażeli, węgla aktywnego czy zeolitów, szczególnie interesujące jest wykorzystanie efektów termicznych, towarzyszących sorpcji chemicznej np. amoniaku i siarczku kobaltu, który może być z powodzeniem wykorzystywany w chemicznych sorpcyjnych ziębiarkach i pompach ciepła (zał. 4.II.L poz. 30). Wychodząc od termodynamicznych podstaw działania takich urządzeń (zał. 4.II.F poz. 11) wspólnie z prof. Zbigniewem Królickim i mgr inż. Bartoszem Zajączkowskim, opracowaliśmy dynamiczny model reaktora chemicznego takiego systemu (zał. 4.II.L poz. 17).

W latach 2009-2014 uczestniczyłem w pracach połączonych zespołów badawczych Centrum Badawczo-Rozwojowego KGHM Cuprum (pod kierunkiem dr. inż. Sławomira Gajosińskiego) Zakładu Chłodnictwa i Systemów Klimatyzacyjnych, Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej (pod kierunkiem prof. Zbigniewa Królickiego). Wraz z pracownikami naukowymi obu zespołów uczestniczyłem w opracowaniu koncepcji klimatyzacji stanowiskowej oraz mikro-klimatyzacji osobistej do zastosowania w kopalni rud miedzi (zał. 4.II.J poz. 4, 5, 6, 7). Ze względu na szeroki zakres prac badawczych, projekt zaowocował szeregiem opracowań, w tym koncepcją modyfikacji konstrukcji kabiny SMG (zał. 4.II.E poz. 19, 20). Wstępne wyniki analiz teoretycznych przedstawionego problemu zostały zaprezentowane podczas Szkoły Aerologii Górniczej (zał. 4.II.L poz. 8). W referacie przedstawiono kluczowe problemy z którymi należy się zmierzyć w obszarze klimatyzacji kopalń, oraz propozycje nietypowych rozwiązań, w tym np. możliwość zastosowania zjawiska adsorpcji, efektu Ranqua-Hirscha oraz materiałów zmiennofazowych. Analizy poszczególnych rozwiązań zostały również zebrane i przedstawione w pracy (zał. 4.II.F poz. 7).

c) systemy trigeneracji oparte na adsorpcji fizycznej i chemicznej

Doświadczenie zdobyte w modelowaniu i rozwiązywaniu problemów technicznych systemów adsorpcyjnych w klimatyzacji stanowiskowej kopalń, pozwoliło mi na aktywny udział w tematyce realizowanej w ramach grantu międzynarodowego dla FORTUM Heat and – Power, Polska (zał. 4.II.J poz. 1). Ta problematyka badawcza dotyczyła budowy adsorpcyjnych systemów trigeneracyjnych, w których wytwarzana jest równocześnie energia elektryczna, ciepło i chłód. Do tego celu zaimplementowano procesy oparte na adsorpcji fizycznej i chemicznej. Uczestniczyłem w pracach badawczych nad optymalizacją konstrukcji adsorberów, optymalnym doбором pary roboczej oraz zapewnieniem warunków ciągłości pracy systemu (zał. 4.II.F poz. 11). Analizowałem również rezultaty badań systemów wielo-adsorberowe i z falą cieplną (zał. 4.II.F poz. 3, 4).

Rezultaty badań eksperymentalnych prowadzonych na rzeczywistym, zbudowanym w ramach projektu (zał. 4.II.J poz. 1) stanowisku, porównano z wynikami symulacji numerycznych i przedstawiono w pracy (zał. 4.II.L poz. 3). We wnioskach badawczych wykazałem, że



w systemach zintegrowanych, w których adsorber znajduje się w jednej obudowie z wymiennikiem ciepła (parownikiem/skraplaczem), ciśnienie w układzie jest wypadkową zjawisk zachodzących w obu subkomponentach. Prace modelowe dotyczące układów zintegrowanych muszą tym samym uwzględniać wpływ adsorbera na ciśnienie, a stopień tego wpływu jest uzależniony od konstrukcji modułu adsorpcyjnego.

d) poprawa efektywności odbioru ciepła w sondach pionowych, wykorzystywanych w sprężarkowych pompach ciepła

W ramach grantów współfinansowanych z Europejskiego Funduszu Społecznego (zał. 4.II.J poz. 2, 3), w latach 2012-2014, kierowałem pracami nad optymalizacją konstrukcji sond gruntowych stosowanych w sprężarkowych pompach ciepła. Współpraca z firmą NANOTEL Wrocław, obejmowała analizę możliwości poprawy efektywności wymiennika gruntowego (zał. 4.II.E poz. 7, 8) i dotyczyła prac koncepcyjnych i modelowych z perspektywą ich wykorzystania w optymalizacji działania wymienników rzeczywistych oraz poszerzenia oferty handlowej (zał. 4.II.L poz. 4). Zaproponowany model numeryczny rozbudowałem dodatkowo o wpływ bocznego efektu cieplnego, a rezultaty zaprezentowałem w formie referatu konferencyjnego na 12th IEA Heat Pump Conference, 15-18 maja 2017, Rotterdam, Holandia (zał. 4.II.L poz. 2). Problem bocznego efektu cieplnego, a przede wszystkim model numeryczny i analiza wpływu tego efektu na przebieg wymiany ciepła w pionowym wymienniku gruntowym, szczegółowo omówiono w pracy (zał. 4.II.A poz. 1) oraz przedstawiono na 24th International Congress of Refrigeration (zał. 4.II.L poz. 4). Prace zawierają nie tylko szczegółową analizę stanu wiedzy i model matematyczny, ale także dyskusję wpływu bocznego efektu cieplnego na głębokość odwiertów, co ma fundamentalne znaczenie w kontekście aplikacyjnym gruntowych wymienników ciepła. Uzyskane rezultaty analiz i modelowania znalazły praktyczne wdrożenie w konstrukcjach instalowanych pomp ciepła (zał. 4.II.E poz. 7, 8).

Podsumowanie:

Na całość mojego dorobku naukowego składa się 86 prac publikowanych (w tym 73 opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora). Jestem również autorem/współautorem 19 prac niepublikowanych stanowiących sprawozdania z przeprowadzonych badań (w tym 10 opracowanych po uzyskaniu stopnia doktora).

Sumaryczny impact factor, według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania:

Dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora inżyniera: 3.563

Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): 3

Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): 1

Ilość punktów MNiSW: 146

