



**Tomasz Prauzner, Jarosław Krzywański, Marcin Sosnowski,
Karolina Grabowska, Anna Żyłka, Anna Kułakowska**
*Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie
al. Armii Krajowej 13/15, 42–200 Częstochowa
e-mail: t.prauzner@ajd.czyst.pl*

NOWOCZESNE ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE SYSTEMÓW CHŁODNICZYCH, JAKO PRZYKŁAD RACJONALIZACJI UŻYTKOWANIA ENERGII, BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI I OCHRONY ŚRODOWISKA

Streszczenie. W artykule przedstawione zostaną aktualne kierunki badań naukowych związanych z nowoczesną konstrukcją systemów chłodzenia. Głównym celem badań jest zwiększenie sprawności pracy tych urządzeń poprzez opracowanie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystujących ciepło odpadowe oraz energię odnawialną solarną i geotermalną.

Słowa kluczowe: chłodziarki adsorpcyjne, sorpcja, ochrona środowiska.

MODERN DESIGN SOLUTIONS OF COOLING SYSTEMS, AS AN EXAMPLE OF ENERGY EFFICIENCY RATIONING, OPERATIONAL SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Abstract. The article presents the current directions of scientific research related to the modern design of cooling systems. The main aim of the research is to increase the efficiency of these devices by developing innovative construction solutions using waste heat as well as solar and geothermal renewable energy.

Keywords: adsorption chillers, sorption, environmental protection.

Rozwój technologiczny w konstrukcji nowoczesnych systemów chłodniczych wyznacza nowe kierunki badań dotyczących poprawy efektywności pracy urządzeń. Główną grupą urządzeń chłodniczych są urządzenia, do których zaliczyć można chociażby chłodziarki sprężarkowe, termoelektryczne, absorpcyjne oraz adsorpcyjne. Innowacyjne podejście technologiczne związane jest z zastosowaniem całkowicie nowych rozwiązań konstrukcyjnych opartych na przykład na wykorzystaniu tzw. efektu magnetokalorycznego, czy chociażby tzw. rurek ciepła. Innym kierunkiem prowadzonych badań dotyczących poprawienia efektywności COP¹ są propozycje ulepszenia warunków pracy urządzenia dzięki wprowadzonym innowacjom w dotychczasowej budowie urządzenia, jak i wzajemnym łączeniu i uzupełnieniu dotychczasowych konstrukcji o elementy innych rozwiązań konstrukcyjnych. Analiza literatury oraz przegląd ofert rynku skłania do refleksji i określenia głównych kierunków badań prowadzonych zarówno w ośrodkach badawczych w kraju, jak i na świecie. Już pobieżna analiza wskazuje na niezwykle obszerną skalę i zakres prowadzonych badań naukowych w tym zakresie. W niniejszej pracy przedstawione zostaną jedynie wybrane przykłady charakterystyczne dla obecnego obszaru prowadzonych badań.

Na szeroką skalę prowadzone są badania w Narodowym Laboratorium Berkeley Lawrence'a (Lawrence Berkeley National Laboratory), związane z wykorzystaniem zjawiska magnetokalorycznego. Stosuje się w nich nowoczesne materiały, które pod wpływem zmiennego pola magnetycznego obniżają swoją temperaturę. Metoda ta posiada szereg zalet w stosunku do metod tradycyjnych. Nie wykorzystuje się tu części mechanicznych ani gazów szkodliwych dla środowiska, natomiast aparatura wykorzystująca rozmagnesowanie adiabatyczne nie zużywa się. Dużą zaletą tej metody jest również mniejsza waga urządzeń do obecnie produkowanych sprężarek. Niestety, na obecnym etapie dużym problemem jest opracowanie na szerszą skalę odpowiednich stopów metali wykazujących efekt magnetokaloryczny, które przy swojej objętości i wadze dorównałyby mocy obecnych chłodziarek powszechnie wykorzystywanych. Na obecną chwilę prowadzone są badania nad wykorzystaniem stopu niklowo-manganowo-galowego wykazującego bardzo duży efekt magnetokaloryczny. Szczegółowe informacje dotyczące technologii magnesowania i rozmagnesowania są utajnione, a pojawiające się informacje są jedynie uogólnionymi danymi. Wiadomo jednak, że domieszkowanie stopów różnymi pierwiastkami wpływa na właściwości magnetokaloryczne. Wiadomo już, że wraz z domieszkowaniem miedzi, wiązania pomiędzy niklem i galem stają się mocniejsze, zaś właściwości magnetyczne stopu zmieniają się [7].

¹COP – współczynnik (termiczny) wydajności chłodniczej systemu DEC definiowany, jako stosunek zapotrzebowania chłodniczego obiektu oraz energii cieplnej potrzebnej do regeneracji wypełnienia sorpcyjnego osuszacza.

Urządzenia klimatyzacyjne wykorzystują zarówno adsorpcję, jak i absorpcję fizyczną lub chemiczną. Proces adsorpcji polega na wiązaniu się cząsteczek, atomów lub jonów na powierzchni lub granicy faz fizycznych, co powoduje lokalne zmiany stężenia graniczących ze sobą faz. Najczęściej jedną z nich jest ciało stałe (tzw. adsorbent), na którego powierzchni lub w jego porach następuje zagęszczenie pochłanianej substancji (adsorbentu). Proces adsorpcji zachodzi w adsorberze, a więc różnego rodzaju zbiornikach (wymyennikach ciepła). To w nim znajduje się adsorbent, do którego doprowadza się w postaci ciekłej lub gazowej adsorbent. Nieco odmiennym sposobem działania urządzeń chłodniczych jest działanie oparte nie, na adsorpcji a absorpcji, która jest procesem wnikania do wnętrza fazy adsorbentu. Wspomniane zjawiska chemiczno-fizyczne często zachodzą jednocześnie, a ich dominacja określona jest poprzez odpowiedni dobór warunków i określonych faz. Aktualnie prowadzone na szeroką skalę badania naukowe związane z urządzeniami chłodniczymi skupiają się na precyzyjnym zdefiniowaniu warunków otoczenia, w jakich zachodzi zjawisko sorpcji. Analiza dostępnych w literaturze projektów wskazuje, iż trudno określić wspólne cechy, jakimi powinno charakteryzować się takie urządzenie. Wyznacznikiem ich przydatności są przede wszystkim warunki otoczenia, w jakich dane urządzenie będzie pracować. Urządzenia klimatyzacyjne pracujące w warunkach charakterystycznych dla krajów położonych w cieplej czy wręcz gorącej strefie klimatycznej są konstruowane odmiennie niż te, które pracować będą w krajach o umiarkowanym czy chłodnym klimacie. Pomimo że zasada ich działania opiera się na tym samym zjawisku adsorpcji czy desorpcji, różnić się będą wprowadzonymi odmiennymi rozwiązaniami budowy. Przykładowo, efektywność urządzeń wykorzystujących adsorpcję fizyczną zależeć będzie przede wszystkim od parametrów transportu ciepła i masy w złożu adsorbentu w postaci pary roboczej, którą wcześniej należy uzyskać z określonego źródła. Kolejnym istotnym czynnikiem będą własności termofizyczne zastosowanych substancji w procesie. Zakres przewidywanego zastosowania i konstrukcji urządzenia, będzie uzależniony od zdefiniowanej odpowiednimi parametrami pary roboczej możliwej do uzyskania w danych warunkach otoczenia. W praktyce wykorzystuje się uniwersalne adsorbenty, które od wielu lat są jedynymi na obecnym etapie rozwoju technologii ich pozyskiwania na szeroką skalę [14]. Zaliczyć można do nich takie adsorbenty wykorzystywane w adsorpcji fizycznej, jak węgle aktywne, aktywne włókna węglowe, silikażele czy zeolity. Czynnikiem chłodniczym najczęściej wykorzystywanym jest woda. Silikażel jest niczym innym jak syntetycznym silikonem, który składa się z bardzo małych ziaren uwodnionego SiO_2 . Dzięki obecności w strukturze grup hydroksylowych $-\text{OH}$, wykazuje skłonność do interakcji z innymi spolaryzowanymi tlenkami, np. wodą lub alkoholami. Obecnie mamy do dyspozycji różne typy silikażeli, a ich podstawowym (praktycznym) parametrem jest typ (wielkość) por. Najczęściej mieszczą się one w granicach od 2nm do 0,7nm.

Obecne badania naukowe skupiają się najczęściej wokół dokładnego wyznaczenia charakterystyki pracy urządzenia poprzez określenie wartości przebiegu izostery, izotermy i izobary adsorpcji.

Problem opracowania wielu rozwiązań konstrukcyjnych związany jest również z opracowaniem przeróżnych rozwiązań mechanicznych, elektrycznych oraz automatyki poprawiających przebieg tego procesu. Proces adsorpcji wykorzystywany jest nie tylko w układach chłodzących, ale również w tzw. osuszaczach adsorpcyjnych. Są to urządzenia służące eliminacji wilgotności z pomieszczeń dzięki zastosowaniu złóż sorbentu, upakowanych np. w postaci układów obrotowych, bębnow (rotorów) sorpcyjnych. Głównym elementem takiego osuszacza jest rotor wykonany na przykład z odpowiednio ukształtowanych elementów metalowych-aluminiowych, dzięki czemu uzyskuje się większą powierzchnię wymiany ciepła. Elementy aluminiowe tworzą tzw. kapilary osiowe pokryte substancją higroskopijną, na przykład silikażelem. W tym samym czasie zachodzi proces suszenia powietrza oraz regeneracji substancji pochłaniającej. W konstrukcji osuszaczy także wykorzystuje się różne konstrukcje (np. DEC², SDEC³), jednak najistotniejszym elementem takiego układu jest sam rotor, który zdecydowanie usprawnia cykl adsorpcji. Przykładem zastosowania takiego rozwiązania w konstrukcji osuszacza powietrza są urządzenia oferowane przez firmę DST Polska Sp.z o.o.

Do regeneracji złoża pochłaniającego można wykorzystać zarówno ciepło odpadowe, jak i energię promieniowania słonecznego pozyskiwaną przy pomocy instalacji słonecznych [9]. Systemy klimatyzacyjne SDEC są coraz częściej stosowane ze względu na odnawialność energii cieplnej, co wiąże się z ochroną środowiska. W zależności od przeznaczenia takiego urządzenia, mogą to być konstrukcje wykorzystujące konwersję energii promieniowania słonecznego na energię chłodniczą na drodze termicznej (kolektory słoneczne lub elektrycznej ogniwa fotowoltaiczne). Wśród nich wykorzystuje się urządzenia pracujące w układach otwartych (z płynnym oraz ze stałym sorbentem) i zamkniętych (absorpcyjne oraz adsorpcyjne) [9].

Charakterystycznymi elementami takiego rozwiązania w układzie klimatyzacyjnym są: sorpcyjny osuszacz powietrza (obrotowy), instalacja słoneczna, obrotowy wymiennik do odzysku ciepła jawnego (nawilżacze adiabaticzne powietrza procesowego oraz regeneracyjnego) oraz konwencjonalna nagrzewnica powietrza regeneracyjnego. Tak rozbudowany układ, wykorzystujący wiele ciekawych rozwiązań technologicznych spełnia obecnie podstawowe

² DEC (z ang. Desiccant and Evaporative Cooling) – system klimatyzacyjny, w którym powietrze klimatyzacyjne w wyniku procesów osuszania sorpcyjnego, chłodzenia adiabaticznego obniża swoją temperaturę.

³ SDEC (z ang. Solar Desiccant and Evaporative Cooling) – system klimatyzacyjny DEC, w którym źródło energii cieplnej do procesu regeneracji wypełnienia sorpcyjnego stanowi instalacja słoneczna.

założenia nowoczesnej instalacji klimatyzacyjnej. Uwzględnia on niskie koszty eksploatacji poprzez niskie zużycie niezbędnej energii pierwotnej (energia cieplna), spełnia normy ekologiczne dzięki zastosowaniu materiałów niewpływających negatywnie na otoczenie w układzie sorpcji opartej na: wodzie, powietrzu, silikażelu, chlorku litu. Jest to układ uniwersalny, który może być zastosowany w niemalże każdych warunkach klimatycznych. Układ może być wykorzystywać odnawialne źródła energii, odpadowej i konwencjonalnej. Ponadto, urządzenie to charakteryzuje się niskim poziomem hałasu charakterystycznym dla urządzeń adsorpcyjnych. Niestety żadne z aktualnie stosowanych rozwiązań technologicznych nie jest pozbawione wad. Tak jest również z układami adsorpcyjnymi, przykładem mogą być dość wysokie – jak na obecną chwilę – koszty inwestycyjne, niezbyt wysokie osiągnięte współczynniki efektywności COP dla układu adsorpcyjnego, wykorzystanie energii słonecznej nie zapewnia pewności w uzyskaniu wymaganych parametrów powietrza wewnętrznego. Ponadto urządzenia absorpcyjne i adsorpcyjne ze względu na skomplikowaną budowę są urządzeniami dużymi, co ogranicza ich powszechne wykorzystanie, a zastosowanie elementów obrotowych (wentylatory, pompy ciepła) zwiększa zużycie energii elektrycznej. Uzyskanie optymalnego współczynnika COP wymaga więc precyzyjnego ustawienia pracy każdego z elementów z układu, co w konsekwencji przekłada się na precyzyjność wykonania podzespołów i wykorzystaniu inteligentnego układu sterującego (nadzorującego pracę). Najistotniejszym elementem zwiększającym efektywność urządzenia jest zwiększenie sprawności pracy obrotowego osuszacza wynikającej chociażby z faktu zwiększenia oporów przepływu powietrza przez rotor poprzez zwiększenie grubości wypełnienia adsorbentu czy też zmianę strumienia przepływu adsorbentu [9]. Wykorzystanie układów mechanicznych, takich jak obrotowe wymienniki ciepła z jednej strony prowadzi do zwiększenia efektywności układu sorpcyjnego, z drugiej strony automatycznie wprowadza bardziej skomplikowaną budowę chłodziarki, głośniejszą pracę poprzez pojawiającą się wibrację elementów obrotowych oraz zwiększoną energochłonność zasilania urządzenia. Być może, dlatego też w literaturze nie odnajdziemy propozycji wykorzystania urządzeń wibracyjnych układu adsorpcyjnego, a obecne badania skupiają się przede wszystkim wokół poprawy parametrów materiałów w układzie adsorbent-adsorbent oraz poszukiwaniu bardziej efektywnych rozwiązań konstrukcyjnych i warunków pracy układu, w którym zachodzi zjawisko sorpcji.

Natomiast nieliczne badania dotyczące wpływu wykorzystania mechanizmu wibracyjnego w układzie chłodziarki absorpcyjnej na współczynnik COP wskazują, iż mechanizm ten poprawia procesy przenoszenia ciepła i masy w złożu [Shen, 2016]. Zdaniem autora, może być stosowany przez producentów komercyjnych jako technologia poprawiająca działanie chillerów absorpcyjnych. Jak podano w badaniach, istnieje optymalna dla określonego agregatu i jego konfiguracji kombinacja częstotliwości drgań i amplitudy, która może polepszyć

przenoszenie ciepła i masy w obrębie złożeń. Jest to więc zagadnienie, które wymaga innowacyjnego podejścia i może stanowić nowy obszar badawczy.

Wykorzystaniu adsorpcji fizycznej w rozwiązaniach klimatyzacyjnych poświęca się najwięcej uwagi. Przykładem mogą być prowadzone na szeroką skalę badania z wykorzystaniem silikażelu jako sorbentu dla wody. Ma on zdolność do adsorpcji dużych ilości wody w niskich temperaturach i do regeneracji w temperaturze poniżej 90°C, a ponadto jest trwały, nietoksyczny i niekorozyjny. Maksymalna wartość COP chłodziarki adsorpcyjnej jest określona przez stosunek ciepła parowania adsorbentu do izosterycznego ciepła adsorpcji dla danego układu [4]. Poprawa współczynnika COP wynika nie tylko z samych parametrów charakteryzujących silikażel, ale również z zastosowanego spoiwa ziarnistego silikażelu naniesionego na płaską powierzchnię.

Podstawowym parametrem, który ma wpływ na efektywność pracy układu sorpcyjnego jest intensyfikacja transportu ciepła (wymiany) na granicy złożeń faz układu sorpcyjnego. Ta intensyfikacja określona jest z kolei m.in. poprzez granulację ziaren silikażelu, grubość jego warstwy w wymienniku ciepła oraz oporu cieplnego wynikającego z geometrycznego rozmieszczenia elementów układu [4]. Powszechnie stosowanym, a jednocześnie podstawowym rozwiązaniem chłodziarki adsorpcyjnej jest układ dwóch jednostek chłodzących pracujących na przemienne, a działających na tej samej zasadzie [3]. W układzie adsorpcyjnym w odróżnieniu od układu absorpcyjnego, adsorbent jest elementem stacjonarnym, co wyznacza i narzuca odpowiednie założenia układu budowy takiego urządzenia. Urządzenie adsorpcyjne działa na zasadzie powtarzających się czterech etapów (ogrzewanie złoża, desorpcja (regeneracja), chłodzenie i adsorpcja) zachodzących przemienne w każdej z jednostek chłodniczych⁴. Kolejnym ciekawym rozwiązaniem chłodziarki adsorpcyjnej jest układ bardziej rozbudowany, z czterema jednostkami chłodniczymi w którym do zasilania urządzenia wykorzystywana jest energia słoneczna [6]. Projekt powstał z myślą o wykorzystaniu urządzenia pod kątem klimatu malezyjskiego. Czynnikiemami chłodniczymi są tu, podobnie jak uprzednio, żel krzemionkowy oraz woda. Wydajność układu określona została dzięki symulacji komputerowej uwzględniającej dane meteorologiczne z Kuala Lumpur. Według uzyskanych wyników, agregat może osiągnąć moc 14 kW. Współczynnik COP można zamodelować w programie TRNSYS w odniesieniu do czasu cykli adsorpcji i desorpcji oraz temperatury.

W tym miejscu warto wspomnieć również o prowadzonych na szeroką skalę badaniach naukowych w Instytucie Techniki i Systemów Bezpieczeństwa Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie. Instytut ten, pomimo iż w powyższym obszarze dociekań naukowych działa od niedawna, wniósł istotny

⁴ Dokładny opis działania urządzenia jest powszechnie opisywany w przytoczonej bibliografii, dlatego też zostanie on pominięty w niniejszej pracy.

wkład w rozwój nowoczesnych urządzeń chłodniczych opartych na zjawisku adsorpcji. Co więcej, efekty nowatorskich rozwiązań technologicznych uzyskały znaczące wyróżnienia w zakresie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych. Głównym zadaniem zespołu badaczy jest minimalizacja rozmiarów chłodziarek adsorpcyjnych wykorzystywanych do produkcji wody lodowej. Podobnie jak w poprzednich projektach, główną myślą badaczy było uzyskanie jak najwyższego współczynnika COP przy użyciu metody polegającej na zastosowaniu wypełnienia złoża adsorbentu warstwą pasty lub materiału wiążącego (kleju) w przestrzeni złoża przylegającej do powierzchni wymiennika ciepła [10]. Uwzględniając konstrukcję chłodziarek adsorpcyjnych, zbudowanych ze stałych złóż adsorbentu, wymianę ciepła pogarsza cechująca takie warstwy porowatość, szczególnie w strefie przyściennej wymiennika. Prowadzone prace badawcze ukierunkowane są, więc w stronę poprawy procesów wymiany ciepła w obrębie złóż. Modyfikacji podlegają, więc wszelkie czynniki mające wpływ na poprawę pracy urządzenia. Są nimi koncepcje modyfikacji konstrukcji złóż adsorbentu poprzez poszukiwanie najodpowiedniejszych miejsc styku adsorbentu z powierzchnią wymiennika ciepła, wykorzystaniu złóż polidispersyjnych i zastosowanie fluidyzacji złóż adsorbentu itp. [11].

Podsumowanie

Problem uzyskania wysokiego współczynnika skuteczności chłodzenia w urządzeniach klimatycznych jest głównym celem licznych badań naukowych, prezentowanych zarówno w polskiej, jak i zagranicznej literaturze. Aktualne badania ukierunkowane są na wykorzystanie zjawiska sorpcji (adsorpcji i absorpcji), z uwzględnieniem różnych rozwiązań konstrukcyjnych urządzenia. Powszechnie stosowane są typowe i dobrze poznane materiały sorpcyjne, jednak ich przydatność w układach klimatyzacyjnych znajduje zastosowanie i popularność w innowacyjnych rozwiązaniach konstrukcyjnych urządzeń. Głównym kierunkiem modyfikacji technologicznej jest wykorzystanie urządzeń wspomagających wiązanie adsorbentu (rotory, układy wibracyjne) oraz modyfikacja rozwiązań wymienników ciepła poprzez zmianę wymiarów geometrycznych i modyfikację konstrukcji w celu optymalizacji. Ze względu na zmniejszenie kosztów związanych z zasilaniem układów klimatycznych, wykorzystuje się tzw. ciepło odpadowe lub energię odnawialną solarną, geotermalną itp. W aplikacjach przemysłowych, w agregatach absorpcyjnych wykorzystuje się najczęściej absorpcje bromolitowe LiBr/H₂O, w agregatach adsorpcyjnych – żel krzemionkowy, zeolity i węgiel aktywny. Podkreśla się opinię, iż wadą chłodziarek adsorpcyjnych jest ich niska sprawność, która powoduje, że mają one dużą masę i rozmiary, co ogranicza ich powszechne zastosowanie. Zaletą jest

niski koszt pozyskiwanego i wykorzystywanego ciepła odpadowego oraz ciche (niewibracyjne) działanie urządzenia.

Na obecnym etapie rozwoju technologii, głównym kierunkiem badań są działania ukierunkowane na zwiększenie zdolności adsorpcyjnych stosowanych układów adsorbent-adsorbat (np. poprzez dobór rozmiaru ziaren adsorbentu), lepsze zarządzanie wymianą ciepła podczas cyklu adsorpcyjno-desorpcyjnego oraz poprawa intensywności transportu masy i ciepła [5]. Stwierdzono, że im mniejszy jest rozmiar ziaren adsorbentu, tym większa jest szybkość procesu adsorpcji. Ponadto, zwiększenie natężenia przepływu gazu skraca czas potrzebny do przebicia złoża adsorbentu [5].

Stosowane rozwiązania konstrukcyjne chłodziarek uzależnione są od wielu czynników, zarówno naturalnych (warunki klimatyczne), jak i ekonomicznych. Przykładem chłodziarek, które łączą w sobie trzy różne technologie – adsorpcję, absorpcję oraz standardowe chłodzenie elektryczne jest nowatorskie rozwiązanie instalacji wykorzystywanej przez powszechnie znany na świecie koncern Fortum we Wrocławiu, który zajmuje się między innymi produkcją energii cieplnej i elektrycznej [2]. Nowatorska instalacja (w fazie ustawicznych badań) funkcjonuje pod nazwą Laboratorium Ciepła i Chłodu. Instalacja pozwala ogrzewać pomieszczenia w zimie z węzła cieplnego, z kolei w ciepłych miesiącach je chłodzić. Układy nadzorujące pracę urządzeń, również adekwatnie do bieżących potrzeb, dokonują korekcyj pracy urządzenia ze względu na przesunięcie szczytu zapotrzebowania na energię elektryczną z zimy na lato. Układy sorpcyjne wykorzystują ciepło sieciowe oraz pochodzące z kolektorów słonecznych. Z perspektywy miejskich przedsiębiorstw energetyki cieplnej lepszym rozwiązaniem jest instalowanie chłodziarek adsorpcyjnych, albowiem do zasilania agregatów wykorzystuje się wodę grzewczą o temperaturze niższej, czyli 60–75°C. Jest to parametr zbliżony do wody zasilającej systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej poza sezonem grzewczym, co stanowi ułatwienie w dostarczaniu ciepła do odbiorcy [8].

Literatura

- [1] Adsorpcyjne osuszacze powietrza, <http://www.dst-polska.com.pl>, (data dostępu 2017).
- [2] Fortum chce we Wrocławiu pozyskiwać chłód z ciepła, Polska Agencja Prasowa (PAP), 2017.
- [3] Gwadera M., Kupiec K., Adsorpcyjne układy chłodnicze, *Inż. Ap. Chem.* 2011, 50, 5.
- [4] Gwadera M., Adsorpcja wody na silikażelu w adsorpcyjnych urządzeniach chłodniczych, *Inż. Ap. Chem.* 2013, 52, 4, s. 317–318.

-
- [5] Gwadera M., Wpływ parametrów procesowych na wymianę masy i ciepła podczas adsorpcji wody na silikażelu, *Technical Issues* 3/2015, s. 25–32.
- [6] Habib K., et al, Study of solar driven silica gel-water based adsorption chiller, 2015 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 88 012068.
- [7] Jurgawka A., Jak chłodzić polem magnetycznym?, <http://kopalniawiedzy.pl>, (data dostępu 2018).
- [8] Kalawa W., Rompska N., Wolny M., Analiza techniczno-ekonomiczna produkcji chłodu z wykorzystaniem miejskiej sieci ciepłowniczej, Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska, <http://kne.itc.pw.edu.pl>, (data dostępu 2018).
- [9] Kowalski P., Wymiana ciepła i masy w obrotowym osuszaczu solarnego systemu klimatyzacyjnego. Rozprawa doktorska. Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2013, s. 10-13, 17, 27–28.
- [10] Krzywański J., Grabowska K., Wesołowska M., Nowak W., Widuch A., Minimalizacja rozmiarów chłodziarek adsorpcyjnych wykorzystywanych do produkcji wody lodowej, Cz.2, *Energetyka Ciepła i Zawodowa*, 2017a.
- [11] Krzywański J., Nowak W., Grabowska K., Widuch A., Wesołowska M., Chłodniej: minimalizacja rozmiarów chłodziarek adsorpcyjnych wykorzystywanych do produkcji wody lodowej, Cz.1, *Energetyka Ciepła i Zawodowa*. 2017b, nr 3, 61, s. 6.
- [12] Pabiś A., Koszut A., Rurki ciepła - zasada działania, budowa, zastosowania, *Czasopismo Techniczne. Chemia*. Nr12/2012.
- [13] Shen Z., The experiment and analysis of active mechanisms for enhancing heat and mass transfer in sorption fluids, *Architectural Engineering - Dissertations and Student Research*, 42, 2016.
- [14] Zajączkowski B., Sorpcyjne Systemy Energetyczne. Procesy adsorpcji i desorpcji w systemach chłodniczych. Politechnika Wroclawska, http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~zajaczkowski/files/ESN1024W/SSE_1_2016.pdf, (data dostępu 2018).