

Rurowy wymiennik ciepła i sposób chłodzenia

Przedmiotem wynalazku jest wymiennik ciepła, pracujący z zawiesiną suchego lodu, przeznaczony do chłodzenia gazu lub cieczy. Wymiennik ten umożliwia zastosowanie czynników roboczych o znikomym wpływie na środowisko. Przedmiotem wynalazku jest także sposób chłodzenia w rurowym wymienniku ciepła za pomocą czynnika chłodzącego, którym jest zestalony dwutlenek węgla, w którym ten zestalony dwutlenek węgla jest otrzymywany w wyniku rozprężania ciekłego dwutlenku węgla w roztworze cieczy pośredniczącej.

Znane są urządzenia chłodnicze wykorzystujące syntetyczne czynniki chłodnicze, takie jak chlorowane i fluorowane węglowodory. Czynniki te, oznaczane jako HCFC oraz HFC, znane są jako powodujące niszczenie warstwy ozonowej i przyczyniające się do tworzenia efektu cieplarnianego. Na skutek działań legislacyjnych, zmierzających do ograniczenia wpływu substancji fluorowanych na środowisko, stopniowo ograniczany jest dostęp do tych czynników. Jako rozwiązanie proponuje się zastosowanie czynników naturalnych, takich jak węglowodory oraz dwutlenek węgla. Dwutlenek węgla (CO_2) jest stosowany coraz częściej w chłodnictwie komercyjnym i przemysłowym.

Znany jest z opisów patentowych US8631666 oraz US2018216851A1 układ chłodniczy wykorzystujący bezpośrednio odparowanie dwutlenku węgla celem uzyskania efektu chłodniczego. Układ taki może być wykorzystywany do uzyskiwania temperatury rzędu -50°C w przestrzeni chłodzonej. Naturalnym ograniczeniem zakresu stosowalności dwutlenku węgla R744 jako czynnika chłodniczego jest temperatura punktu potrójnego, tj. $-56,5^\circ\text{C}$. Poniżej tej temperatury CO_2 występuje jako suchy lód, co sprawia duże trudności w wykorzystaniu w zamkniętym obiegu chłodniczym.

Dla uzyskania wartości temperatury poniżej -50°C stosuje się niskowrzące substancje fluorowane, takie jak trifluorometan (R23) lub węglowodory takie jak etan (R170) oraz etylen (R1150). Substancje te są palne (węglowodory) oraz przyczyniają się do wzrostu efektu cieplarnianego (R23). Czynniki R23 charakteryzuje się niezwykle wysoką wartością współczynnika tworzenia efektu cieplarnianego, na poziomie 14800. W chwili obecnej nie istnieją bezpieczne dla środowiska i użytkowników bezpośrednio zamienniki czynnika R23, dlatego warunkowo został on dopuszczony do stosowania w ramach obowiązującego aktu prawnego EU 517 („ustawa F-gazowa”). Jednak ograniczany kontyngent możliwych do

wprowadzenia na rynek europejski substancji fluorowanych powoduje znaczne utrudnienia w pozyskaniu czynnika R23.

W opisach patentowych JP2008224206A, CN103357192B oraz EP1939548A1 przedstawiono koncepcję wykorzystania dwutlenku węgla jako czynnika chłodniczego w postaci suchego lodu w zamkniętym obiegu chłodniczym. W opisanych rozwiązaniach chłodzenie realizowane jest dzięki rozprężeniu ciekłego dwutlenku węgla do wartości ciśnienia poniżej punktu potrójnego, co powoduje uwolnienie czynnika pod postacią suchego lodu oraz pary suchej.

Zastosowanie dwutlenku węgla w postaci stałej jako czynnika chłodniczego zostało opisane w publikacjach [H. Yamaguchi, X.R. Zhang, K. Fujima, Basic study on new cryogenic refrigeration using CO₂ solid-gas two phase flow, *International Journal of Refrigeration*. 31 (2008) 404–410] oraz [R. Langebach, U. Hesse, Y. Xu, CO₂ as an Alternative Refrigerant for Applications Below -50°C, *International Compressor Engineering, Refrigeration and Air Conditioning, and High Performance Buildings Conferences*. (2016) 1–10]. Rozwiązanie takie sprawia jednak szereg problemów, takich jak zatykanie przewodów i elementów dławiących.

W celu rozwiązania problemów związanych ze stosowaniem dwutlenku węgla w postaci stałej możliwe jest zastosowanie cieczy pośredniczącej, pozwalającej na rozpuszczenie stałej frakcji CO₂, co zostało przedstawiono w publikacji [G. Di Nicola, F. Polonara, R. Stryjek, A. Arteconi, Performance of cascade cycles working with blends of CO₂ + natural refrigerants, *International Journal of Refrigeration*. 34 (2011) 1436–1445]. Możliwa do osiągnięcia temperatura procesu bez osiągnięcia krystalizacji jest jednak ściśle zależna od udziału dwutlenku węgla w roztworze. Rozwiązanie z zastosowaniem limonenu jako czynnika pośredniczącego przedstawiono w opisie patentowym US6516626. Urządzenie zawiera sprężarkę pary dwutlenku węgla, zbiorniki pośredniczące, armaturę regulacyjną oraz pompę obiegową zawieszony suchego lodu. Przedstawione rozwiązanie nie rozstrzyga kwestii zasilania powszechnie występujących wymienników ciepła o wielu obiegach.

Proces związany z wytrącaniem stałego CO₂ z roztworu w warunkach kriogenicznych oraz kolejno sublimacji suchego lodu, znany z opisu patentowego US9254448B2, wykorzystywany jest w procesie oczyszczania gazu ziemnego.

W rozwiązaniach przemysłowych do chłodzenia gazu lub cieczy przy wykorzystaniu przemiany fazowej (odparowania) czynnika roboczego stosowane są rurowe wymienniki ciepła, jak z opisu US6460372. Wymienniki te są ożebrowane lub posiadają rury pozbawione ożebrowania. Wymienniki te posiadają zwykle wiele równoległych obiegów czynnika

roboczego. Istotne jest, że elementem regulacyjnym w takich wymiennikach jest zawór rozprężny. W wyniku zdławienia ciekłego czynnika roboczego powstaje mieszanina cieczy i pary suchej nasyconej. Ze względu na różnicę gęstości frakcji takiej mieszaniny występuje ryzyko nierównomiernego zasilania poszczególnych sekcji wymiennika. Z tego względu stosuje się rozdzielacz mokrej pary czynnika chłodniczego pozwalający na wyrównanie profilu prędkości przed rozdziałem. Element taki znany jest z opisu nr US3120743. Równomierne zasilanie sekcji uzyskuje się tu poprzez odpowiednie zdławienie przepływu wynikające z zastosowania rurek kapilarnych o małej średnicy pomiędzy sekcjami wymiennika a rozdzielaczem. Jednak w obiegu chłodniczym, wykorzystującym zawieszinę suchego lodu, niemożliwe jest zastosowanie powyższego rozwiązania ze względu na zatykanie rurek kapilarnych o małej średnicy wewnętrznej i określonej długości. Zastosowanie rozwiązania, jak z opisu US6460372 spowoduje nierównomierne zasilanie poszczególnych sekcji, z jednocześnie występującą możliwością zablokowania przepływu przez stały dwutlenek węgla. Z opisu patentowego US6442966 znany jest stały element dławiący w postaci gwintowanego walca z równoprzelotowym otworem. Z opisu patentowego US4644974 znany jest natomiast element dławiący w postaci zwężki Venturiego.

Celem wynalazku było umożliwienie realizacji procesu chłodzenia z zastosowaniem dwutlenku węgla CO₂ w warunkach ciśnienia i temperatury poniżej punktu potrójnego (5,2 bar, -56,5°C), z wykorzystaniem cieczy pośredniczącej w procesie wymiany ciepła. Celem wynalazku było wyeliminowanie problemów natury technicznej związanych z występowaniem dwutlenku węgla w postaci suchego lodu, takich jak zatykanie się przewodów i elementów rozprężnych. Celem wynalazku było także osiągnięcie równomiernej dystrybucji czynnika roboczego do poszczególnych sekcji wymiennika, w którym zachodzi proces przemiany fazowej (sublimacji i odparowania).

Rurowy wymiennik ciepła przystosowany do pracy z czynnikiem chłodzącym w postaci zawiesziny zestalonego dwutlenku węgla w cieczy pośredniczącej, wyposażony w obiegi rurowe, których wlot jest usytuowany w kolektorze cieczowym, przed którym znajduje się zawór rozprężny, według wynalazku charakteryzuje się tym, że przed zaworem rozprężnym znajduje się kolektor parowy z wlotem i wylotem czynnika chłodzącego oraz z umieszczonym wewnątrz tego kolektora wymiennikiem regeneracyjnym, zaś na wlocie do każdego obiegu rurowego znajduje się dysza rozprężna o osi równoległej do osi rury wymiennika, a wylot każdego obiegu rurowego znajduje się w kolektorze parowym.

Wymiennik ciepła według wynalazku może być wymiennikiem płaszczowo-rurowym lub może nie być wyposażony w płaszcz. Wymiennik rurowy może być wyposażony w lamele.

Zaworem rozprężnym może być stały element rozprężny, taki jak rurka kapilarna. Zaworem rozprężnym może być także zawór termostatyczny, elektroniczny lub automatyczny.

Korzystnie, rury wymiennika są gładkie lub ożebrowane zewnętrznie. Rury wymiennika mogą być wykonane z miedzi lub jej stopów lub ze stali węglowej lub nierdzewnej i łączone poprzez spawanie lub lutowanie twarde. Korzystnie, promień gięcia rur wymiennika wynosi co najmniej 12 mm, a podziałka rur wymiennika wynosi co najmniej 24 mm.

Korzystnie, regeneracyjny wymiennik ciepła ma postać węzownicy.

Sposób chłodzenia w rurowym wymienniku ciepła, za pomocą czynnika chłodzącego, którym jest zestalony dwutlenek węgla, w którym ten zestalony dwutlenek węgla jest otrzymywany w wyniku rozprężania ciekłego dwutlenku węgla w roztworze cieczy pośredniczącej, według wynalazku charakteryzuje się tym, że wprowadzany do wymiennika rurowego ciekły roztwór dwutlenku węgla w cieczy pośredniczącej w stanie nasycenia chłodzi się w wymienniku regeneracyjnym umieszczonym w kolektorze parowym do osiągnięcia temperatury o 15 do 50 K niższej od temperatury cieczy nasyconej dopływającej do wymiennika ciepła, po czym roztwór poddaje się wstępnemu zdławieniu w zaworze rozprężnym, a spadek ciśnienia wynosi od 10 do 80% różnicy ciśnienia pomiędzy ciśnieniem cieczy dopływającej do wymiennika a ciśnieniem panującym po rozprężeniu w dyszy rozprężnej, tj. ciśnieniu sublimacji. Wstępnie zdławiony roztwór kieruje się do kolektora cieczowego, w którym rozdziela się strumień czynnika chłodzącego na obiegi rurowe wymiennika, przy czym na wejściu do każdego obiegu rurowego roztwór rozpręża się w dyszy rozprężnej do warunków przepływu trójfazowego układu ciało stałe-ciecz-para. Czynniki chłodzący wychodzący z każdego obiegu rurowego wprowadza się do kolektora parowego i stosuje się do wstępnego chłodzenia ciekłego czynnika chłodzącego wprowadzanego do wymiennika regeneracyjnego.

Korzystnie jako czynnik chłodzący stosuje się mieszaninę binarną lub wieloskładnikową, zawierającą co najmniej 50% wag. dwutlenku węgla.

Korzystnie cieczą pośredniczącą jest substancja z grupy węglowodorów nasyconych (alkanów) lub węglowodorów nienasyconych (alkenów) o liczbie atomów węgla w cząsteczce od 3 do 4 lub fluorowana lub jodowana pochodna węglowodorów nasyconych lub

nienasyconych, dla której liczba atomów węgla w cząsteczce zawiera się w granicach od 1 do 3 a liczba atomów fluoru od 2 do 4, a liczba atomów jodu wynosi od 0 do 1. Najkorzystniejszą cieczą pośredniczącą jest wybrana z grupy zawierającej: butan, izobutan, propan, propylen, eter dimetylowy, difluorometan, tetrafluoropropylen, trifluorojodometan lub ich mieszaniny.

Konstrukcja wymiennika rurowego i sposób według wynalazku pozwalają na zastosowanie dwutlenku węgla jako czynnika chłodniczego w warunkach temperatury procesu poniżej $-56,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, tj. temperatury punktu potrójnego, bez ryzyka zatykania się przewodów i elementów rozprężnych. Wlot do każdego obiegu rurowego wymiennika wyposażony jest we właściwy element dławiący w postaci dyszy rozprężnej. Zastąpienie długiej i cienkiej rurki kapilarnej znanej ze stanu techniki, dyszą usytuowaną w miejscu połączenia przestrzeni kolektora cieczowego z rurami wymiennika powoduje, że wytrącenie się stałego dwutlenku węgla ma miejsce za przewężeniem tej dyszy, co w konsekwencji eliminuje ryzyko zatkania się elementów rozprężnych. W celu osiągnięcia temperatury procesu przemiany fazowej rzędu $-60\text{--}-78^{\circ}\text{C}$ i minimalizacji poślizgu temperatury korzystnie jest, aby roztwór zawierał co najmniej 50% wag. dwutlenku węgla.

Rozwiązanie według wynalazku umożliwia także równomierną dystrybucję czynnika chłodzącego do poszczególnych sekcji wymiennika, w których zachodzi proces przemiany fazowej (sublimacji i odparowania). Ciekły roztwór wprowadzany do wymiennika rurowego zostaje dochłodzony w wymienniku regeneracyjnym do takiej temperatury, że po wstępnym rozprężeniu w zaworze rozprężnym nie powstaje para wtórna i nie występuje krystalizacja. Rozprężony jednofazowy roztwór kierowany jest do kolektora wlotowego. W kolektorze następuje rozdzielanie strumienia czynnika na poszczególne obiegi wymiennika.

Każdą z sekcji wymiennika podzielić można w zależności od rodzaju przepływu na poszczególne podsekcje. Pierwsza to przepływ zawiesiny suchy lód-ciecz z niewielką ilością pary suchej. Ilość frakcji stałej opisana jest ułamkiem molowym, który zawiera się w przedziale $0\text{--}0,5$. W kolejnej podsekcji, ze względu na wzrost temperatury roztworu wynikający z dostarczania ciepła, następuje zanik frakcji stałej wynikający ze zwiększonej rozpuszczalności i wysublimowania części suchego lodu. Kolejną wydzielić można sekcję przepływu dwufazowego układu ciecz-para, gdzie stopień suchości pary jest $x < 0,8$. W rurach wymiennika nie następuje całkowite odparowanie. Pozostała mieszanina parowo-cieczowa zostaje odparowana i następnie przegrzana w wymienniku regeneracyjnym. Dzięki przedstawionemu rozwiązaniu problemu związanego z budową wymiennika ciepła stanowiącego sublimator dla zawiesiny suchego lodu w cieczy pośredniczącej możliwe jest rozszerzenie zakresu stosowalności dwutlenku węgla w zastosowaniach przemysłowych i

zastąpienie czynnika chłodniczego R23, dla którego brak innych bezpiecznych zamienników. Dodatkowo, rozwiązanie takie przyczynia się do redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Wynalazek został bliżej przedstawiony w przykładzie wykonania oraz na rysunku, na którym: fig. 1 przedstawia schemat ideowy wymiennika ciepła pracującego z zawieszoną suchego lodu, fig. 2 – przebieg przemiany czynnika roboczego przepływającego przez wymiennik ciepła na wykresie w układzie ciśnienie-entalpia, fig. 3 – wymiennik ciepła do chłodzenia cieczy w widoku z boku, fig. 4 – wymiennik ciepła do chłodzenia cieczy w widoku z góry, fig. 5 oraz fig. 6 – wymiennik ciepła do chłodzenia cieczy w przekroju poprzecznym B-B i wzdłużnym A-A, fig. 7 – szczegół przekroju miejsca montażu dyszy rozprężnej w wymienniku do chłodzenia cieczy, fig. 8 – wymiennik ciepła do chłodzenia gazu w widoku z boku, fig. 9 – wymiennik ciepła do chłodzenia gazu w widoku z góry, fig. 10 oraz fig. 11 – wymiennik ciepła do chłodzenia gazu w przekroju poprzecznym B-B i wzdłużnym A-A, fig. 12 – szczegół przekroju miejsca montażu dyszy rozprężnej w wymienniku do chłodzenia gazu.

Czynnik roboczy składający się z dwutlenku węgla w ilości 80 % wag. oraz propanu jako cieczy pośredniczącej, będący w stanie nasycenia A (patrz fig. 2) doprowadzany jest poprzez króciec 15 do wymiennika regeneracyjnego 5, gdzie zostaje dochłodzony do stanu B, a następnie skierowany poprzez króciec wylotowy 16 wymiennika regeneracyjnego 5 do zaworu rozprężnego 6, gdzie zostaje wstępnie zdławiony. Zawór ten spełnia funkcję regulacyjną, a spadek ciśnienia w zaworze rozprężnym 6 wynosi 12 bar, dzięki czemu nie powstają pęcherzyki pary i nie występuje krystalizacja dwutlenku węgla z roztworu. Ciekły roztwór w stanie cieczy nasyconej po przejściu przez zawór rozprężny 6 przepływa do kolektora cieczowego 3, gdzie następuje rozdział czynnika roboczego na poszczególne rury wymiennika 1 stanowiące poszczególne obiegi. W miejscu połączenia przestrzeni kolektora cieczowego 3 z rurami wymiennika 1 zamontowane są dysze rozprężne 2, gdzie następuje właściwe rozprężenie czynnika roboczego do stanu D. Ze względu na obniżenie ciśnienia i temperatury następuje krystalizacja dwutlenku węgla z roztworu ciekłego. Wytrącenie się stałego dwutlenku węgla ma miejsce za przewężeniem dyszy rozprężnej 2, co w konsekwencji zabezpiecza poprawną pracę i eliminuje ryzyko zatkania się elementu rozprężnego. Czynniki robocze, składający się po rozprężeniu z fazy stałej, ciekłej oraz pary suchej, przepływając przez rury wymiennika 1 odbiera ciepło od omywającego rury gazu lub cieczy. Na skutek dostarczania ciepła do czynnika roboczego następuje złożony proces sublimacji stałej frakcji i odparowywania rozpuszczalnika. Niecałkowicie odparowany czynnik roboczy w stanie E dopływa do kolektora parowego, gdzie kontynuowany jest proces

przemiany fazowej na rzecz dochłodzenia ciekłego czynnika w wymienniku regeneracyjnym 5 ze stanu A do B. Z króćca parowego 13 odpływa para sucha nasycona lub przegrzana czynnika roboczego w stanie F. Przepływ zdławionego czynnika roboczego w kierunku poziomym odbywa się z góry na dół, co zapewnia właściwy przepływ zawiesiny suchego lodu i obieg oleju. Ze względu na zastosowanie wymiennika regeneracyjnego 5 zapewnione jest całkowite odparowanie ciekłego rozpuszczalnika.

Przykład 1.

Wymiennik ciepła przedstawiony na fig.3-7 jest wymiennikiem płaszczowo-rurowym, przeznaczonym do chłodzenia cieczy. Wymiennik ma płaszcz 8, głowicę 9 rozdzieloną przegrodą 10, rury wymiennika 1, dysze rozprężne 2, kolektor cieczowy 3 wydzielony przegrodą 10 z przestrzeni głowicy 9, kolektor parowy 4 wydzielony przegrodą 10 z przestrzeni głowicy 9, wymiennik regeneracyjny 5, zawór rozprężny 6. Rury wymiennika 1 zamontowane w ścianie sitowej 7 są wykonane z miedzi. Rury wymiennika 1 łączone są poprzez lutowanie twarde z kolektorem cieczowym. Pomiędzy kolektorem cieczowym 3 a rurami wymiennika 1 zamontowane są dysze rozprężne 2, które wykonane są z mosiądzu i zamontowane na wlocie do danej, odpowiednio ukształtowanej rury wymiennika ciepła poprzez lutowanie twarde. Wylot rur wymiennika 1 połączony jest z kolektorem parowym 4, w którym zainstalowany jest regeneracyjny wymiennik ciepła 5 połączony z wlotem zaworu rozprężnego 6. W płaszczu 8 znajduje się króciec wlotowy cieczy chłodzonej 11 oraz króciec wylotowy cieczy chłodzonej 12. W części głowicy 9 stanowiącej kolektor parowy 4 znajduje się króciec wlotowy wymiennika regeneracyjnego 15, króciec wylotowy wymiennika regeneracyjnego 16 oraz króciec parowy 13. W części głowicy 9 stanowiącej kolektor cieczowy znajduje się króciec cieczowy 14.

Przykład 2.

Wymiennik ciepła przedstawiony na fig.8-12 służy do chłodzenia gazu, w szczególności powietrza. Wymiennik ciepła do chłodzenia gazu ma rury wymiennika 1, dysze rozprężne 2, kolektor cieczowy 3, kolektor parowy 4, wymiennik regeneracyjny 5, zawór rozprężny 6. Na rurach wymiennika 1 są osadzone lamele aluminiowe, stanowiące blok lamelowy 18. Rury wymiennika 1 zamontowane w lameli konstrukcyjnej 19 są wykonane z ze stali węglowej. Rury wymiennika 1 łączone są poprzez lutowanie twarde. Pomiędzy kolektorem cieczowym 3 połączonym z rurami wymiennika 1 rurą łączącą 17, zamontowane są dysze rozprężne 2, które wykonane są z mosiądzu i zamontowane na wlocie do danej, odpowiednio ukształtowanej rury wymiennika ciepła poprzez lutowanie twarde. Wylot rur wymiennika 1 połączony jest z kolektorem parowym 4, w którym zainstalowany jest regeneracyjny

wymiennik ciepła 5 połączony z wlotem zaworu rozprężnego 6. W kolektorze parowym 4 znajduje się króciec wlotowy wymiennika regeneracyjnego 15, króciec wylotowy wymiennika regeneracyjnego 16 oraz króciec parowy 14. W kolektorze cieczowym 3 znajduje się króciec cieczowy 14.