

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **239532**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **431779**

(51) Int.Cl.
F01K 25/10 (2006.01)
F02C 6/14 (2006.01)

(22) Data zgłoszenia: **13.11.2019**

(54) **System i sposób magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
17.05.2021 BUP 10/21

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
13.12.2021 WUP 37/21

(73) Uprawniony z patentu:
POLITECHNIKA ŚLĄSKA, Gliwice, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:
ŁUKASZ BARTELA, Pilchowice, PL
ANNA SKOREK-OSIKOWSKA, Gliwice, PL
MARCIN LUTYŃSKI, Gliwice, PL

(74) Pełnomocnik:
rzecz. pat. Katarzyna Borkowy

PL 239532 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest system i sposób magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla, mający zastosowanie w energetyce dla bilansowania systemów elektroenergetycznych, w których występuje zmienny potencjał źródeł wytwórczych i/lub zmienne zapotrzebowanie na energię elektryczną. Przedmiot wynalazku może być stosowany przy współpracy z rurociągiem przesyłowym dwutlenku węgla w stanie gazowym oraz korzystnie z wykorzystaniem pokopalnianej infrastruktury podziemnej.

Systemy magazynowania energii pozwalają na przejście energii elektrycznej z systemu elektroenergetycznego w okresie nadwyżki produkcji i zmagazynowanie jej, w zależności od metody, w postaci energii chemicznej, energii mechanicznej, energii elektrochemicznej, czy też ciepła, aż do okresu znacznego w zwiększone zapotrzebowanie na energię elektryczną. Wtedy dokonywana jest konwersja zmagazynowanej energii ponownie do energii elektrycznej. Do najpopularniejszych, wielkoskalowych rozwiązań należą szeroko wykorzystywane na świecie elektrownie szczytowo-pompowe. Mniej popularnymi rozwiązaniami, choć ciągle dynamicznie rozwijanymi, są systemy magazynujące energię w postaci sprężonego lub ciekłego powietrza. Są to odpowiednio systemy CAES (ang. *Compressed Air Energy Storage*) oraz LAES (ang. *Liquid Air Energy Storage*). Układ wykorzystujący sprężone powietrze znany jest z amerykańskiego opisu patentowego US7389644. Na etapie ładowania nadwyżkowa energia wykorzystywana jest dla zasilania silnika elektrycznego napędzającego sprężarkę powietrza. Wysokociśnieniowe powietrze jest magazynowane, a następnie przy zwiększonym zapotrzebowaniu na energię elektryczną, jego potencjał energetyczny jest wykorzystywany w ekspanderze, napędzającym generator energii elektrycznej.

Systemy magazynowania energii w sprężonym powietrzu mają na ogół niższą sprawność od elektrowni szczytowo-pompowych. Wynika to głównie ze strat identyfikowanych na etapie ładowania systemu, a ściślej z generacji entropii podczas realizacji procesu sprężania. W układach diabatycznych otrzymywane w procesie sprężania ciepło jest rozpraszane w otoczeniu. Wykorzystuje się w tym celu chłodnice zabudowane między sekcjami sprężarki oraz za sprężarką. Wysokociśnieniowe powietrze o niskiej temperaturze po zmagazynowaniu kierowane jest ze zbiornika celem wykonania pracy w ekspanderze. Czynnik roboczy przed wprowadzeniem do ekspandera musi zostać podgrzany. W tak zwanych układach diabatycznych w tym celu, w atmosferze powietrza, spala się paliwo gazowe, co stanowi istotną niedogodność. W układach adiabatycznych istnieje możliwość zagospodarowania ciepła chłodzenia sprężanego powietrza, ale wymaga to jego zmagazynowania, aż do rozpoczęcia etapu rozładowywania systemu, kiedy to ciepło może zostać wykorzystane dla podgrzewu powietrza trafiającego ze zbiornika ciśnieniowego do prądotwórczego zespołu ekspandera. Magazynowanie ciepła wymaga wyposażenia układu w zasobniki wykorzystujące stałe materiały akumulacyjne, albo też nośniki ciekłe (np. olej termalny). Przykładem zastosowania materiałów ceramicznych, jako wypełnień akumulacyjnych dużego systemu magazynowania ciepła wysokotemperaturowego, jest zasobnik zaplanowany w instalacji opracowywanej w Niemczech, w ramach projektu ADELE. Zasobnik ciepła zaplanowany jest jako instalacja naziemna. Sprężarka jest konstrukcją dwusekcyjną, gdzie pomiędzy sekcjami zabudowana jest chłodnica rozpraszająca ciepło w otoczeniu. Podział realizowanego łącznie stosunku ciśnień na dwie sekcje jest dobrany dla uzyskania za drugą sekcją powietrza wysokociśnieniowego o temperaturze 600°C. Powietrze takie przepływa przez zasobnik oddając ciepło materiałowi ceramicznemu. Tak zmagazynowane ciepło oddawane jest do powietrza przepływającego przez zasobnik na etapie rozładowywania systemu, kiedy to powietrze kierowane jest ze zbiornika podziemnego do zespołu ekspandera. Dużą niedogodnością w zastosowaniu koncepcji takiego zasobnika jest potrzeba jego zaprojektowania jako konstrukcji grubościennej, o wysokich walorach wytrzymałościowych. Wynika to z wymaganych, dużych objętości materiału akumulacyjnego oraz dużych różnic pomiędzy ciśnieniem powietrza przez niego przepływającego, a powietrza atmosferycznego. W ramach projektu ALACAES, prowadzonego w Szwajcarskim Lugano, rozwinięto koncepcję zabudowy zasobnika ciepła w przestrzeni magazynowej zbiornika ciśnieniowego na sprężone powietrze. Dzięki takiemu zabiegowi możliwe jest wyrównanie profili ciśnień pomiędzy objętością roboczą zasobnika ciepła, a jego otoczeniem, co sprzyja redukcji naprężeń w konstrukcji płaszcza i w konsekwencji pozwala na projektowanie zasobników jako konstrukcji cienkościennych. Instalacja pilotażowa, choć zaplanowana i wybudowana jako naziemna, ma symulować warunki, jakie są właściwe dla podziemnych wyrobisk korytarzowych kopalni. Niedogodnością

stosowania koncepcji są trudności związane z zabudową rurociągów mających transportować sprężone, gorące powietrze na drodze pomiędzy naziemną maszynownią systemu CAES, a podziemnym magazynem z zasobnikiem ciepła.

Zaletą każdego z rozwiązań pozwalających na magazynowanie energii w sprężonym powietrzu jest powszechna dostępność do nośnika energii. Niezależnie od rozwiązania systemu CAES istotną niedogodnością, przy dużej skali przedsięwzięcia, jest za to potrzeba wykorzystywania zbiorników podziemnych o szczelnej i wytrzymałej strukturze, pozwalającej na okresowe zmagazynowanie powietrza na ogół przy ciśnieniach rzędu 5–10 MPa. W tym celu, tak jak stało się to w przypadku dwóch funkcjonujących na świecie systemów (Huntorf w Niemczech oraz McIntosh w Stanach Zjednoczonych), wykorzystywane mogą być kawerny solne, które powstają na drodze ługowania złóż soli. W przypadku wielu państw potencjał geologiczny jest w tym zakresie jednak ograniczony z uwagi na brak, lub też występowanie tylko obszarowo wysokich spięrzeń złóż, nadających się do przeprowadzenia zabiegu ługowania. W wielu państwach potrzeba strategicznego magazynowania ropy naftowej oraz gazu ziemnego sprawia, że praktycznie każda nadająca się lokalizacja zostaje zaadaptowana dla rezerwowania paliw, stanowiących fundament w świetle bezpieczeństwa energetycznego. W literaturze przedmiotu, prócz kawern solnych oraz wyrobisk pokopalnianych, wskazywane są warstwy wodonośne. Identyfikowany, najpoważniejszy problem w zakresie adaptacji tych miejsc jako objętości magazynowych związany jest z wysoką bezwładnością procesów akumulacji sprężonego powietrza w materiałach porowatych, co stoi na przeszkodzie organizacji systemów o wysokich mocach zainstalowanych w sprężarkach oraz ekspanderach. Przeszkodą dla organizacji systemu magazynowego przy planowanej inwestycji w Stanach Zjednoczonych, w ramach programu Iowa Storage Energy Park, stała się przykładowo niska przepuszczalność warstw piaskowca w wybranej pod inwestycję lokalizacji. Bardzo dużym potencjałem magazynowym odznaczają się dostępne objętości wyrobisk kopalnianych. Tutaj na przeszkodzie stoi jednak bardzo często struktura górotworu, która przy stosowaniu wysokich ciśnień może prowadzić do utraty szczelności magazynu. Bardzo dużym potencjałem objętościowym, mogącym stanowić podstawę dla organizacji magazynów, charakteryzują się kopalnie węgla kamiennego. W tym przypadku organizacja takiego magazynu wymagałaby jednak kosztownych operacji zabezpieczenia górotworu przed niepożądanym wnikaniem powietrza w jego strukturę, co mogłoby w przypadku kontaktu powietrza z pozostałymi pokładami węgla prowadzić do wystąpienia pożarów endogenicznych. Z tego powodu optymalne, w segmencie objętości magazynowej infrastruktury pokopalnianej, będzie organizowanie przestrzeni magazynowej w ramach wycofywanych lub wycofanych z eksploatacji kopalni wydobywających kopaliny niepalne. Przykładem może być tutaj planowana inwestycja w Stanach Zjednoczonych, w ramach projektu NORTON, mająca wykorzystywać jako zasobnik na sprężone powietrze podziemne wyrobiska zamkniętej kopalni wapienia. Innym rozwiązaniem, co jest domeną proponowanego wynalazku, jest stosowanie jako nośników energii gazów obojętnych, w tym właśnie, właściwego dla niniejszego wynalazku, dwutlenku węgla.

Celem wynalazku jest wysokoefektywne magazynowanie energii elektrycznej w ramach systemów elektroenergetycznych przy zapewnieniu wysokich możliwości adaptacji objętości poeksploatacyjnych kopalń węgla kamiennego, przy minimalizacji ryzyka eksploatacyjnego, typu utrata szczelności oraz pożary endogeniczne.

Cel ten osiągnięto na drodze wykorzystania zespołu sprężarki CO₂, zespołu ekspandera CO₂, dwóch cylindrycznych zbiorników podziemnych o dużych wysokościach względem średnicy, mogących stanowić poeksploatacyjne szyby kopalniane, przy czym w jednym ze zbiorników zabudowany jest zasobnik na ciepło, stanowiący płaszcz cylindryczny z wypełnieniem akumulacyjnym w postaci stałej (np. materiał ceramiczny lub materiał skalny), natomiast drugi zbiornik podziemny połączony jest z korytarzową infrastrukturą kopalnianą, gdzie mogą zalegać złoża węgla kamiennego. System magazynowania energii wymaga dostępu do rurociągu przesyłowego dwutlenku węgla, który jest składową szeroko pojętego systemu separacji, transportu oraz składowania lub utylizacji CO₂. Taka infrastruktura przesyłowa może być dostępna dla systemu magazynowania w wielu rejonach świata z uwagi na kierunek działań legislacyjnych, mających przyczynić się do globalnego ograniczenia antropogenicznej emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

System magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla z komorą dekompresyjną charakteryzuje się tym, że zbudowany jest z co najmniej dwóch podziemnych zbiorników magazynowych na dwutlenek węgla, wysokociśnieniowego zbiornika cylindrycznego, wewnątrz którego współosiowo umieszczony jest zasobnik ciepła w postaci zbiornika cylindrycznego z wypełnieniem akumulacyjnym, który w górnej części połączony jest przez zawór z ekspanderem dwutlenku węgla, zabudowanym na

wspólnym wale z generatorem energii elektrycznej i cylindrycznej komory dekompresyjnej z umieszczonymi w górnej objętości sitami, wewnątrz rurą wglębną, przy czym rura wglębna, poprzez zawór połączona jest ze sprężarką dwutlenku węgla, napędzaną silnikiem elektrycznym oraz poprzez zawór połączoną z górną częścią zasobnika ciepła, natomiast cylindryczna komora dekompresyjna, za pomocą przepustnic połączona jest ze zbiornikiem korytarzowym z zabudowanym wentylatorem, natomiast w górnej części posiada zabudowany zawór, łączący ją z jednostką oczyszczania metanu.

Korzystnie system magazynowania energii według wynalazku ma wysokociśnieniowy zbiornik cylindryczny, który połączony jest z rurociągiem przesyłowym dwutlenku węgla zaworem.

Korzystnie system magazynowania energii według wynalazku ma zasobnik ciepła, który oddzielony jest od zbiornika cylindrycznego zaworem.

Korzystnie system magazynowania energii według wynalazku ma jednostkę oczyszczania metanu połączoną zaworem z rurą wglębną.

Korzystnie w systemie magazynowania energii według wynalazku jako źródło wysokociśnieniowego dwutlenku węgla stosuje się rurociąg przesyłowy dwutlenku węgla.

Sposób magazynowania energii polega na tym, że dwutlenek węgla o wysokim ciśnieniu w zakresie do ciśnienia krytycznego 7,38 MPa, pobierany jest z sieci przesyłowej poprzez zawór, po czym podlega buforowaniu po przepływie przez zawór w wysokociśnieniowym zbiorniku lub na etapie rozładowywania systemu magazynowania energii, zasila zasobnik ciepła odbierając ciepło od wypełnienia akumulacyjnego, przy czym po odbiorze ciepła gorący dwutlenek węgla opuszcza zasobnik ciepła w górnej jego części i przepływa przez zawór do ekspandera dwutlenku węgla, gdzie rozprężając się wykonuje pracę wykorzystywaną do napędu generatora energii elektrycznej, następnie dwutlenek węgla przepływa przez zawór do rury wglębnej, przez którą wprowadzony jest do komory dekompresyjnej w dolnej jej części, po czym dwutlenek węgla, dzięki pracy wentylatora, przy przepływie przez przepustnicę, krąży między komorą dekompresyjną, a objętością podziemnego zbiornika korytarzowego, uwalniając gazy z pokładów węgla, w tym wysokoenergetyczny metan, stanowiących pozostałość poeksploatacyjną kopalni, przy czym w objętości komory dekompresyjnej mieszanina gazów podlega separacji grawitacyjnej, co na drodze przeciwdziałania ruchom konwekcyjnym wspomagają sita, następuje zagęszczenie metanu w górnej części komory dekompresyjnej oraz zagęszczenie dwutlenku węgla w dolnej jej części, odbiór gazu przez zawór i skierowanie go do jednostki oczyszczania metanu, przy czym odseparowany dwutlenek węgla jest zwracany do objętości komory dekompresyjnej przez zawór oraz rurą wglębną, po czym na etapie ładowania dwutlenek węgla z komory dekompresyjnej oraz zbiornika korytarzowego przepływa przez rurę wglębną oraz zawór do sprężarki, gdzie dwutlenek węgla podlega procesowi sprężania do ciśnienia niższego, niż ciśnienie krytyczne 7,38 MPa i wprowadzany jest przez zawór do zbiornika wysokociśnieniowego lub/i następnie przez zawór do sieci przesyłowej dwutlenku węgla, przy czym ciepło wywiązane w procesie sprężania jest wcześniej przejęte przez wypełnienie akumulacyjne zasobnika ciepła.

Wynalazek bliżej objaśniono w przykładzie zobrazowanym rysunkiem, który przedstawia strukturę systemu, z zaznaczeniem najważniejszych jej komponentów. Na rysunku uwidocznił system, w skład którego wchodzi dwa podziemne zbiorniki magazynowe dla dwutlenku węgla, z czego jeden stanowi cylindryczny zbiornik wysokociśnieniowy (1), natomiast drugi stanowi cylindryczną komorę dekompresyjną (8), umożliwiającą magazynowanie dwutlenku węgla po procesie rozprężania, który jest realizowany w ekspanderze dwutlenku węgla (5). Zbiornik wysokociśnieniowy jest połączony przez zawór (14) z rurociągiem przesyłowym CO₂, mogącym stanowić element infrastruktury CCS (ang. *Carbon Capture and Storage*), przy czym w zależności od relacji ciśnień przepływ występujący przy otwartym zaworze (14) może być dwukierunkowy. W objętości zbiornika wysokociśnieniowego zabudowany jest zasobnik ciepła (2), którego przestrzeń akumulacyjna od przestrzeni magazynowej zbiornika wysokociśnieniowego oddzielona jest zaworem (15). Praca zaworu (15) pozwala na elastyczne buforowanie dwutlenku węgla i okresowe ukierunkowywanie jego przepływu na drodze pomiędzy rurociągiem CO₂, a zbiornikiem wysokociśnieniowym lub zasobnikiem ciepła. Zasobnik ciepła stanowi zbiornik cylindryczny (3) z zabudowanym wewnątrz wypełnieniem akumulacyjnym (4), którego porowatość umożliwia, przy otwartych zaworach (16) i (17), przepływ CO₂ z rurociągu CO₂ lub zbiornika wysokociśnieniowego do ekspandera dwutlenku węgla (5), czemu towarzyszy podgrzew gazu w obrębie zasobnika (2), albo przy otwartych zaworach (20) i (21), przepływ CO₂ ze sprężarki dwutlenku węgla (12) do zbiornika wysokociśnieniowego lub bezpośrednio do rurociągu przesyłowego, czemu towarzyszy chłodzenie gazu w obrębie zasobnika (2). Praca ekspandera (5), który napędza generator energii elektrycznej (6), jest właściwa dla etapu rozładowywania systemu magazynowania energii elektrycznej, natomiast praca

sprężarki dwutlenku węgla, napędzanej przez silnik elektryczny (13), jest właściwa dla etapu ładowania tego systemu. Na etapie rozładowywania dwutlenek węgla po rozprężeniu, przez otwarty zawór (17), wprowadzony zostaje przez rurę wgłębną (7) do dolnej części komory dekompresyjnej (8). Komora dekompresyjna połączona jest z dużą objętością zbiornika korytarzowego, stanowiącego system korytarzy kopalnianych i ewentualnie innych wyrobisk poeksploatacyjnych, przez wykorzystanie dwóch kanałów z zabudowanymi przepustnicami (22) i (23). Przez przepustnicę (22), korzystnie usytuowaną niżej, dwutlenek węgla wprowadzany jest z objętości komory dekompresyjnej do objętości magazynowej zbiornika korytarzowego. Część dwutlenku węgla przepływając przez system kanałów korytarzowych podlega adsorpcji w pozostałych po eksploatacji kopalni pokładach węgla i pokładach pozabilansowych, czemu towarzyszy proces odmetanowania. Podczas tego procesu, prócz samego metanu, uwalniane są ze złoża inne gazy, a w tym głównie azot oraz niewielka ilość tlenu. Proces odmetanowania może być realizowany przy zamkniętych przepustnicach (22) i (23), ale sam transport dwutlenku węgla oraz uwolnionych gazów do komory dekompresyjnej odbywa się dzięki wsparciu pracą wentylatora (24), przy otwartych przepustnicach. Dwutlenek węgla wraz z uwolnionymi gazami wprowadzony zostaje z powrotem do przestrzeni komory dekompresyjnej przez przepustnicę (23). W strukturze zbiornika swobodnie wymieszane gazy podlegają separacji grawitacyjnej – w górnej części szybu gromadzi się głównie metan, którego gęstość jest niemalże trzykrotnie niższa od gęstości dwutlenku węgla. Najkorzystniejsze warunki dla rozdziału gazów panują przy braku wymuszonych przepływów w objętości komory dekompresyjnej, a więc w okresie poza etapem ładowania oraz rozładowywania systemu magazynowania energii. Przeszkodą dla efektywnej separacji grawitacyjnej mogą być ruchy konwekcyjne, powstające na skutek wzrostu temperatury ścianki komory dekompresyjnej wraz z jej głębokością. Dla ograniczenia takich ruchów konwekcyjnych korzystne jest zastosowanie w górnej objętości komory sit tworzących przeszkodę dla pionowo przemieszczających się gazów. Zbierający się w górnej strefie komory dekompresyjnej gaz o wysokiej zawartości metanu kierowany jest przez zawór (18) do jednostki oczyszczania metanu (11), z której gaz ten, już jako paliwo, w zależności od uzyskanej czystości, podlegać może bezpośredniemu energetycznemu wykorzystaniu lub też może być kierowany do sieci gazu ziemnego. W jednostce oczyszczania metanu (11) z objętości gazu odseparowanego od metanu wydzielane są również te składniki, których obecność jest niepożądana w trakcie transportu CO₂ do miejsca składowania lub utylizacji. Odzyskany w jednostce oczyszczania metanu (11) dwutlenek węgla jest zawracany przez zawór (19) oraz rurę wgłębną (7) do komory dekompresyjnej. Dwutlenek węgla na etapie ładowania systemu magazynowania z komory dekompresyjnej kierowany jest przez zawór (20) do sprężarki dwutlenku węgla (12), która napędzana jest przez silnik elektryczny (13), zasilany energią elektryczną, podlegającą magazynowaniu w systemie. Procesowi sprężania towarzyszy przyrost temperatury dwutlenku węgla. Wysokociśnieniowy oraz wysokotemperaturowy gaz trafia przez zawór (21) do zasobnika ciepła (2), gdzie oddaje ciepło materiałowi akumulacyjnemu. Wychłodzony gaz przez zawór (14) trafia do rurociągu CO₂ lub przez zawór (15) do zbiornika wysokociśnieniowego, w którym jest buforowany.

Zaletą rozwiązania według wynalazku jest wyeliminowanie potrzeby organizacji w systemie magazynowania wielkogabarytowych, podziemnych objętości mających służyć dla wysokociśnieniowego magazynowania gazowego nośnika energii. Potrzeba magazynowania gazów przy zdecydowanie niższych ciśnieniach pozwala na adaptację jako objętości magazynowych zbiorników infrastruktury górniczej, stanowiącej szyby, podszybia, wyrobiska korytarzowe, czy też zbiorniki retencyjne, gdzie ciśnienie nie powinno być zbyt wysokie z uwagi na bezpieczną ich eksploatację.

Korzystne jest zastosowanie dwutlenku węgla jako nośnika energii, który w odróżnieniu od tlenu stanowiącego składnik powietrza, jest gazem inertnym, co zapewnia bezpieczeństwo eksploatacji z punktu widzenia wystąpienia w pokopalnianej objętości magazynowej pożarów endogenicznych. Korzystne jest wykorzystanie w systemie gazu o wysokiej zawartości CO₂, w składzie którego nie występuje woda, co jest podyktowane bezpieczeństwem eksploatacji wykorzystywanych rurociągów transportowych. Suchy gaz, w odróżnieniu od stosowanego w systemach CAES powietrza atmosferycznego, nie stwarza zagrożeń erozyjnych dla pracujących w systemie wirnikowych maszyn przepływowych, ani też ryzyka obładzenia kanałów przepływowych.

Korzystne jest adaptowanie objętości magazynowej w tych kopalniach, gdzie nie występuje ryzyko wstrząsów górotworu, mogących mieć następstwo w postaci utraty szczelności magazynu.

Korzystne jest adaptowanie dużej objętości magazynowej, w której gromadzony będzie rozprężony dwutlenek węgla, zapewniającej dużą pojemność energetyczną systemu, przy zachowaniu niewielkich wahań ciśnienia w pełnym cyklu pracy systemu. Niskie wahania ciśnienia w komorze dekompresyjnej wraz z możliwością wykorzystywania przy tym stało ciśnieniowego źródła dwutlenku węgla

oraz buforowanie tego gazu w zbiorniku wysokociśnieniowym przyczyni się do pracy sprężarki CO₂ oraz ekspandera CO₂ przy obciążeniach bliskich obciążeniu nominalnemu, co będzie korzystne z uwagi na wysoką, średniokresową sprawność tych maszyn, a w konsekwencji również wysokich sprawności systemu magazynowania energii.

Na wypadek możliwości wystąpienia nieszczelności korzystne jest zorganizowanie objętości rezerwowej w strukturze zbiorników pokopalnianych, która po wypełnieniu magazynowanym dwutlenkiem węgla pozwoli na awaryjne obniżenie ciśnienia zgromadzonego dwutlenku węgla w eksploatacyjnej części magazynu, aż do momentu uszczelnienia zbiornika.

Korzystne jest adaptowanie dla magazynowania niskociśnieniowego CO₂ objętości korytarzowych bogatych w niewyczerpane złoża węgla o wysokiej metanowości. Uzyskany na drodze odmetałowania gaz energetyczny przyczynia się do wzrostu efektywności energetycznej systemu. Do wzrostu efektywności przyczynia się również proces samej adsorpcji CO₂ w złożu na skutek zmniejszenia ilości dwutlenku węgla podlegającej procesowi sprężania na etapie ładowania systemu, względem ilości CO₂, która wcześniej podlega rozprężaniu w ekspanderze.

Poziom ciśnienia panującego w części magazynowej, stanowiącej pokopalniany zbiornik korytarzowy powinien być możliwie wysoki z punktu widzenia procesu sorpcji CO₂ w poeksploatacyjnych złożach węgla, a równocześnie nie wyższy od poziomu maksymalnego zapewniającego bezpieczną eksploatację magazynu z uwagi na jego stabilność, co gwarantuje szczelność górotworu. Poziom panującego ciśnienia determinuje również wielkość pracy jednostkowej wykonywanej przez sprężarkę dwutlenku węgla na etapie ładowania systemu magazynowania energii oraz wielkość pracy jednostkowej wykonanej przez dwutlenek węgla w obrębie ekspandera, na etapie rozładowywania systemu magazynowania.

Korzystna jest geometria szybów pogórnich podlegających adaptacji. W przypadku szybu adaptowanego na zbiornik wysokociśnieniowy istnieje możliwość zabudowy zasobnika ciepła opartego na wykorzystaniu zbiornika cylindrycznego gwarantującego uzyskanie jednorodnej prędkości gazu przy przepływie przez porowate wypełnienie akumulacyjne, co sprzyja warunkom wymiany ciepła. Duża wysokość szybu względem jego średnicy jest korzystna z uwagi na rozkład naprężeń wewnątrz ścian szybu, powstających na skutek działania ciśnienia buforowanego dwutlenku węgla. W przypadku szybu adaptowanego na komorę dekompresyjną geometria walcowa o osi pionowej, charakteryzująca się dużą wysokością oraz względnie niewielką średnicą jest korzystna z punktu widzenia warunków realizacji separacji grawitacyjnej mieszaniny dwutlenku węgla oraz gazów otrzymanych w procesie odmetałowania. Dla ograniczenia mieszania się gazów w objętości komory dekompresyjnej, co pozwoli na lepszą ich separację grawitacyjną, korzystne jest zminimalizowanie ruchów konwekcyjnych występujących na skutek wymiany ciepła między gazami, a ścianą zbiornika. Z tego punktu widzenia korzystne jest zastosowanie wypełnienia sitowego w górnej objętości komory dekompresyjnej oraz termiczne zizolowanie ścian zbiornika. Korzystne jest również chłodzenie ścian zbiornika w dolnej jego strefie, co jest możliwe na drodze odpowiedniego zorganizowania procesu ekspansji dwutlenku węgla w ekspanderze, po której rozprężony dwutlenek węgla będzie charakteryzował się niską temperaturą. Zabieg ten pozwoli na przeciwdziałanie ustalaniu się różnic temperatur ścian zbiornika w związku z występującym przyrostem temperatury górotworu wraz z głębokością, wynoszącym około 3 K na każde 100 m głębokości. Niższa temperatura dwutlenku węgla będzie miała ponadto wpływ na polepszenie warunków dla realizacji procesu adsorpcji CO₂ w strukturach węglowych przy przepływie gazu przez kanał zbiornika korytarzowego. Dla wsparcia procesu separacji metanu z mieszaniny gazowej korzystne może być zastosowanie metody separacji membranowej lub zmiennociśnieniowej.

Możliwe jest zorganizowanie zbiornika ciśnieniowego oraz komory dekompresyjnej w objętości jednego szybu pokopalnianego, przy czym dla zminimalizowania strat ciepła mogących występować przy transporcie gorącego CO₂ na duże odległości zbiornik wysokociśnieniowy, korzystnie zabudowany powinien zostać w górnej strefie szybu. Korzystny przy tym będzie dostęp z niżej zabudowanej komory dekompresyjnej do głębiej zlokalizowanych w górotworze systemów korytarzowych. Możliwe jest zaplanowanie systemu bez zbiornika ciśnieniowego. W tej sytuacji zasobnik ciepła może być zabudowany w objętości komory dekompresyjnej, co jednak z uwagi na różnice ciśnień pomiędzy gazami po dwóch stronach płaszcza zasobnika, będzie wymagało jego zaprojektowania jako konstrukcji odpornej na występowanie naprężeń mechanicznych. Wtedy też zasobnik ciepła i dalej ekspander zasilany będzie bezpośrednio dwutlenkiem węglem pobieranym z rurociągu transportowego, co będzie wiązało się przy stosunkowo niewielkich ilościach transportowanego gazu, z okresowymi zmianami warunków przepływo-

wych panujących w rurociągu. Korzystniejsze jest wobec tego stosowanie zbiornika wysokociśnieniowego jako zbiornika buforującego, który długookresowo będzie zasilany, lub będzie oddawał dwutlenek węgla do rurociągu przesyłowego, oraz krótkookresowo będzie oddawał dwutlenek węgla do ekspandera lub też przejmował dwutlenek węgla opuszczający sprężarkę.

Zastrzeżenia patentowe

1. System magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla z komorą dekompresyjną, **znamienny tym**, że zbudowany jest z co najmniej dwóch podziemnych zbiorników magazynowych na dwutlenek węgla, wysokociśnieniowego zbiornika cylindrycznego (1), wewnątrz którego współosiowo umieszczony jest zasobnik ciepła (2) w postaci zbiornika cylindrycznego (3) z wypełnieniem akumulacyjnym (4), który w górnej części połączony jest przez zawór (16) z ekspanderem dwutlenku węgla (5), zabudowanym na wspólnym wale z generatorem energii elektrycznej (6) i cylindrycznej komory dekompresyjnej (8) z umieszczonymi w górnej objętości sitami (9), wewnątrz rurą wglębną (7), przy czym rura wglębna (7), poprzez zawór (20) połączona jest ze sprężarką dwutlenku węgla (12), napędzaną silnikiem elektrycznym (13) oraz poprzez zawór (21) połączoną z górną częścią zasobnika ciepła (2), natomiast cylindryczna komora dekompresyjna (8), za pomocą przepustnic (22), (23) połączona jest ze zbiornikiem korytarzowym (10) z zabudowanym wentylatorem (24), natomiast w górnej części posiada zabudowany zawór (18), łączący ją z jednostką oczyszczania metanu (11).
2. System magazynowania energii według zastrz. 1, **znamienny tym**, że wysokociśnieniowy zbiornik cylindryczny (1) połączony jest z rurociągiem przesyłowym dwutlenku węgla zaworem (14).
3. System magazynowania energii według zastrz. 1, **znamienny tym**, że zasobnik ciepła (2) oddzielony jest od zbiornika cylindrycznego (1) zaworem (15).
4. System magazynowania energii według zastrz. 1, **znamienny tym**, że jednostka oczyszczania metanu (11) połączona jest zaworem (19) z rurą wglębną (7).
5. System magazynowania energii według zastrz. 1, **znamienny tym**, że jako źródło wysokociśnieniowego dwutlenku węgla stosuje się rurociąg przesyłowy dwutlenku węgla.
6. Sposób magazynowania energii, **znamienny tym**, że dwutlenek węgla o wysokim ciśnieniu w zakresie do ciśnienia krytycznego 7,38 MPa, pobierany jest z sieci przesyłowej poprzez zawór (14), po czym podlega buforowaniu po przepływie przez zawór (15) w wysokociśnieniowym zbiorniku (1) lub na etapie rozładowywania systemu magazynowania energii, zasila zasobnik ciepła (2) odbierając ciepło od wypełnienia akumulacyjnego (4), przy czym po odbiorze ciepła gorący dwutlenek węgla opuszcza zasobnik ciepła (2) w górnej jego części i przepływa przez zawór (16) do ekspandera dwutlenku węgla (5), gdzie rozprężając się wykonuje pracę wykorzystywaną do napędu generatora energii elektrycznej (6), następnie dwutlenek węgla przepływa przez zawór (17) do rury wglębnej (7), przez którą wprowadzony jest do komory dekompresyjnej (8) w dolnej jej części, po czym dwutlenek węgla, dzięki pracy wentylatora (24), przy przepływie przez przepustnicę (22) i (23) krąży między komorą dekompresyjną (8), a objętością podziemnego zbiornika korytarzowego (10), uwalniając gazy z pokładów węgla, w tym wysokoenergetyczny metan, stanowiących pozostałość poeksploatacyjną kopalni, przy czym w objętości komory dekompresyjnej (8) mieszanina gazów podlega separacji grawitacyjnej, co na drodze przeciwdziałania ruchom konwekcyjnym wspomagają sita (9), następuje zagęszczenie metanu w górnej części komory dekompresyjnej (8) oraz zagęszczenie dwutlenku węgla w dolnej jej części, odbiór gazu przez zawór (18) i skierowanie go do jednostki oczyszczania metanu (11), przy czym odseparowany dwutlenek węgla jest zawracany do objętości komory dekompresyjnej (8) przez zawór (19) oraz rurę wglębną (7), po czym na etapie ładowania dwutlenek węgla z komory dekompresyjnej (8) oraz zbiornika korytarzowego (10) przepływa przez rurę wglębną (7) oraz zawór (20) do sprężarki (12), gdzie dwutlenek węgla podlega procesowi sprężania do ciśnienia niższego, niż ciśnienie krytyczne 7,38 MPa i wprowadzany jest przez zawór (15) do zbiornika wysokociśnieniowego (1) lub/i następnie przez zawór (14) do sieci przesyłowej dwutlenku węgla, przy czym ciepło wywiązane w procesie sprężania jest wcześniej przejęte przez wypełnienie akumulacyjne (4) zasobnika ciepła (2).

Rysunek

