

**Podziemny magazyn na sprężone powietrze zabudowany zwłaszcza  
w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym**

Przedmiotem wynalazku jest podziemny magazyn na sprężone powietrze zabudowany zwłaszcza w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym, przeznaczony zwłaszcza dla magazynowania powietrza oraz akumulacji ciepła chłodzenia sprężonego powietrza w ramach adiabatycznych systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu (ACAES, *Adiabatic Compressed Air Energy Storage*).

Przedmiot wynalazku może znaleźć zastosowanie w ramach systemów magazynowania sprężonego powietrza, gdzie przestrzeń magazynowa zorganizowana jest w objętości wyrobisk kopalnianych, stanowiących wycofane z eksploatacji szyby.

Magazyny na sprężone powietrze są nieodzownymi elementami struktury systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu (CAES). Prócz samego magazynu w systemach CAES konieczne jest zastosowanie zespołu sprężarki powietrza (sprężarka oraz silnik elektryczny), gdzie proces sprężania powietrza atmosferycznego prowadzony jest na drodze wykorzystania energii elektrycznej kierowanej do systemu magazynowania. Innym, nieodzownym elementem jest zespół ekspandera powietrza (ekspander oraz generator energii elektrycznej), który umożliwia konwersję energii potencjalnej zmagazynowanego wcześniej powietrza do energii elektrycznej. Praca zespołu sprężarki jest realizowana na etapie ładowania systemu CAES, który to proces ma miejsce w okresach nadprodukcji energii w systemach wytwórczych, z kolei praca ekspandera odbywa się na etapie rozładowywania systemu CAES, a więc w sytuacji, w której występuje zwiększone zapotrzebowanie na energię w systemie elektroenergetycznym. Magazyny energii elektrycznej wykorzystujące sprężone powietrze stanowią koncepcję proponowaną dla zastosowań systemowych i jako takie stanowią konkurencję dla najpowszechniej stosowanych elektrowni szczytowo-pompowych. Duża skala realizowanych na świecie przedsięwzięć wymaga na ogół planowania zbiorników na sprężone powietrze jako konstrukcji podziemnych. Najczęściej w tym celu wykorzystuje się kawerny solne - naturalne lub powstałe na drodze ługowania złoża. Jednak wykorzystanie kawern solnych jako potencjalnych magazynów sprężonego

powietrza w wielu krajach, w tym w Polsce, jest obecnie praktycznie niemożliwe ze względu na strategiczną konieczność zwiększania pojemności magazynowania węglowodorów: ropy naftowej i gazu ziemnego. Potrzeba zwiększania objętości magazynowanych paliw, wobec niedostatecznej pojemności istniejących magazynów oznacza, że praktycznie każde spełniające warunki kawerny solne wykorzystane zostaną jako magazyny kluczowych importowanych surowców, których dostępność ma fundamentalne znaczenie dla gospodarki i bezpieczeństwa Państwa.

W systemach CAES na etapie sprężania, z uwagi na towarzyszący procesowi przyrost temperatury sprężanego powietrza, konieczne jest stosowanie międzysekcyjnego chłodzenia powietrza oraz stosowanie chłodzenia powietrza opuszczającego sprężarkę. Chłodzenie międzysekcyjne jest realizowane celem zmniejszenia jednostkowej pracy procesu sprężania oraz dla zapewnienia bezpiecznej temperatury sprężanego powietrza z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji sprężarki. Chłodzenie powietrza opuszczającego sprężarkę, tj. przed jego wprowadzeniem do zbiornika magazynowego (naziemnego lub podziemnego), jest zdeterminowane termowyttrzymałością stosowanych w konstrukcjach zbiorników materiałów oraz chęcią ograniczenia strat ciepła do otoczenia. Skutkiem prowadzonych procesów chłodzenia powietrza jest jego magazynowanie przy temperaturze na ogół niskiej. W związku z niskim potencjałem takiego powietrza dla wykonania pracy w ekspanderze, na etapie rozładowywania systemu CAES wykorzystuje się zabiegi mające na celu podgrzew powietrza. W klasycznym wariacie CAES, tzw. wariacie diabatycznym, przyrost temperatury czynnika trafiającego do ekspandera uzyskiwany jest na drodze spalania w atmosferze sprężonego powietrza paliwa gazowego. Alternatywnym wariantem jest wykorzystanie ciepła chłodzenia powietrza, które realizowane było na etapie procesu sprężania. Tak zorganizowany system mieści się w ramach definicji tzw. adiabatycznego systemu CAES (ACAES).

Zasobnik ciepła w systemie ACAES ma za zadanie zmagazynowanie ciepła przejętego od sprężonego powietrza, aż do rozpoczęcia etapu rozładowywania, w którym sprężone powietrze opuszcza magazyn i skierowane jest do ekspandera napędzającego generator energii elektrycznej. Dla zwiększenia pracy jednostkowej powietrze przed wprowadzeniem do ekspandera podlega procesowi podgrzewu na drodze wykorzystania ciepła zmagazynowanego podczas etapu ładowania systemu magazynowania energii elektrycznej. Znanych jest kilka rozwiązań magazynowania wysokotemperaturowego ciepła chłodzenia sprężanego powietrza. Temperatura powietrza opuszczającego daną sekcję sprężarki osiągać

może poziom nawet ponad 600 °C. System odbioru ciepła oraz jego magazynowania powinien umożliwić schłodzenie powietrza sprężonego do poziomu gwarantującego bezpieczeństwo eksploatacyjne magazynów sprężonego powietrza, ale równocześnie powinien umożliwić zmagazynowanie ciepła przy wysokim poziomie temperatury magazynowania, co pozwoli uzyskać wysoki stopień podgrzewu powietrza kierowanego do ekspandera na etapie rozładowywania systemu ACAES, a tym samym zapewni wysoką efektywność procesu rozprężania. Z tego względu bardzo często proponowane jest zastosowanie w zasobnikach ciepła stałych materiałów akumulacyjnych, mogących stanowić elementy ceramiczne, beton lub naturalne skały. Przykładem wykorzystania materiałów ceramicznych jest zasobnik ciepła zastosowany w ramach najbardziej zaawansowanego na świecie demonstracyjnego systemu adiabatycznego ADELE, zlokalizowanego w Niemczech. Zasobnik ciepła stanowi konstrukcję naziemną, gdzie w cylindrycznym zbiorniku betonowym zorganizowano wypełnienie z profilami ceramicznymi, umożliwiającymi zmagazynowanie ciepła przy temperaturze 600 °C. Niedogodnością rozwiązania jest konieczność wykorzystania w konstrukcji zasobnika zbiornika betonowego o bardzo grubych, zbrojonych ścianach, co jest podyktowane wysokimi naprężeniami z uwagi na różnice pomiędzy ciśnieniem powietrza atmosferycznego, a ciśnieniem powietrza podlegającego magazynowaniu, oddającego lub odbierającego ciepło od materiału ceramicznego.

Zastosowanie skał jako materiału akumulującego ciepło testowano w ramach instalacji demonstracyjnej zasobnika ciepła zabudowanego wewnątrz zbiornika na sprężone powietrze. Takie zorganizowanie zasobnika ciepła umożliwia zmniejszenie naprężeń w płaszczu zewnętrznym zasobnika z uwagi na wyrównane profile ciśnień po obu stronach przegrody, co umożliwia stosowanie cienkościennego zbiornika z wypełnieniem akumulacyjnym. Instalacja zlokalizowana w Szwajcarskim Lugano zabudowana jest jako naziemna, ale symulowane warunki odpowiadają warunkom, jakie są właściwe dla podziemnych wyrobisk korytarzowych kopalni. Niedogodnością dla zastosowania koncepcji rozwijanej przez firmę ALACAES przy wykorzystaniu wyrobisk korytarzowych kopalni węgla są trudności w zabudowie rurociągów mających transportować sprężone, gorące powietrze na drodze pomiędzy naziemną maszynownią (zespół sprężarki oraz zespół ekspandera), a podziemnym magazynem z zasobnikiem ciepła lub ewentualnie trudności w zabudowie maszynowni jako instalacji podziemnej, w bliskim sąsiedztwie magazynu zintegrowanego z zasobnikiem ciepła. W odniesieniu do wykorzystania dla magazynowania ciepła materiałów stałych innym

możliwym rozwiązaniem jest zastosowanie w tym celu ciekłego oleju termalnego. Na etapie ładowania systemu ACAES powietrze chłodzone jest przeponowo przez olej kierowany do wymienników ze zbiornika oleju zimnego. Po odbiorze ciepła podgrzany olej kierowany jest do zaizolowanego termicznie zbiornika oleju gorącego i tam jest magazynowany, aż do rozpoczęcia etapu rozładowywania systemu ACAES. Gorący olej kierowany jest wtedy do przeponowego wymiennika ciepła, gdzie oddaje ciepło powietrzu kierowanemu z magazynu sprężonego powietrza do ekspandera. Niedogodnością systemu z wykorzystaniem oleju termalnego jest potrzeba zastosowania przeponowych wymienników ciepła, jak również względy bezpieczeństwa związane z wykorzystaniem wysokotemperaturowego oleju. Dodatkowo stosowane oleje termalne na ogół nie pozwalają na podgrzew do temperatury powyżej 400 C. Niedogodnością stosowania olei termalnych jest ich stosunkowo niska pojemność cieplna, która w odniesieniu do masy jest około dwukrotnie niższa niż ma to miejsce w przypadku wody.

Celem wynalazku jest magazynowanie wysokociśnieniowego powietrza wprowadzanego do zbiornika jako wysokotemperaturowe, z zachowaniem względów bezpieczeństwa dla stosowanych materiałów oraz przy minimalizacji strat ciepła do otoczenia magazynu, w ramach adiabatycznych systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu.

Cel osiągnięto poprzez zastosowanie cylindrycznego, szczelnego zbiornika podziemnego o osi pionowej, mogącego zwłaszcza stanowić poeksploatacyjny szyb kopalniany, w którym zabudowano zasobnik na ciepło, stanowiący konstrukcję opartą o zastosowanie płaszczowych elementów cylindrycznych z izolacją termiczną, zabudowanych szeregowo w osi zbiornika podziemnego i wypełnionych wkładem akumulującym ciepło.

Podziemny magazyn na sprężone powietrze zabudowany zwłaszcza w poeksploatacyjnym szybie kopalnianym stanowiący pionowy, cylindryczny zbiornik podziemny, korzystnie poeksploatacyjny szyb kopalniany **charakteryzuje się tym, że** zawiera zbiornik ciśnieniowy mający obudowę oraz dno, od góry szczelnie zamknięty pokrywą z zabudowanym króćcem doprowadzającym poprzez zawór odcinający sprężone, wysokotemperaturowe powietrze oraz zawór odcinający odprowadzający wysokotemperaturowe powietrze, przy czym wewnątrz zbiornika współosiowo usytuowane są szeregowo elementy cylindryczne podwieszane w położeniu pionowym na wspornikach pionizujących, zamknięte od góry pokrywą, od dołu dennicą z klapami ciśnieniowymi,

zewnątrznie pokryte izolacją termiczną z włókien szklanych lub ceramicznych (8), wewnątrz wypełnione wkładem akumulacyjnym.

Korzystne rozwiązanie magazynu według wynalazku charakteryzuje się tym, że ma w pokrywie zabudowany jest właz rewizyjny.

Korzystne rozwiązanie magazynu według wynalazku charakteryzuje się tym, że jako wkład akumulacyjny stosuje się elementy skalne lub ceramiczne, podtrzymywane na dnach sitowych, umożliwiające podgrzew do wysokich temperatur.

Przedmiot wynalazku w przykładzie realizacji jest bliżej objaśniony w oparciu o rysunek, przedstawiający przekrój przez zaadaptowany na magazyn powietrza cylindryczny szyb kopalniany w płaszczyźnie wyznaczonej jego osią. Na rysunku uwidoczniono magazyn na sprężone powietrze, gdzie zastosowanie ma pionowy, cylindryczny zbiornik podziemny, którego obudowa 6, dno 13 oraz pokrywa 5 tworzą szczelny zbiornik ciśnieniowy. W pokrywie zbiornika umiejscowiona jest szczelna pokrywa zasobnika ciepła 3, stanowiącego integralny element zbiornika na sprężone powietrze. Zasobnik ciepła składa się z elementów cylindrycznych 7, zewnątrznie pokrytych izolacją termiczną z włókien szklanych lub ceramicznych 8 i wewnątrz wypełnionych wkładem akumulującym ciepło 9, stanowiącym elementy skalne, osadzone na dnach sitowych 10. Elementy cylindryczne 7 zasobnika oraz dna sitowe 10 zabudowane są w osi zbiornika podziemnego. Dna sitowe 10 usytuowane są pomiędzy kołnierzami poszczególnych elementów cylindrycznych zasobnika ciepła. Zasobnik ciepła zawieszony jest w przestrzeni zbiornika podziemnego na wspornikach pionizujących 11. Gorące, sprężone powietrze wprowadzane jest do zbiornika przez rurociąg wlotowy z zabudowanym zaworem odcinającym 2 i przepływa osiowo przez zasobnik ciepła oddając ciepło skalnemu materiałowi akumulacyjnemu. Ostatnim elementem zasobnika ciepła, przez który przepływa powietrze na etapie ładowania zbiornika jest dennica z kłapami ciśnieniowymi 12. Geometria elementów cylindrycznych 7 oraz ilość wkładu akumulującego ciepło 9 jest dobrana celem zapewnienia odpowiedniego stopnia wychłodzenia powietrza wprowadzanego do przestrzeni zbiornika, niestanowiącej jednocześnie objętości zasobnika ciepła. Zważywszy na to, iż powietrze zgromadzone w zbiorniku przejmowało będzie ciepło od wkładu akumulacyjnego 9 na drodze niepożądanego przenikania, ważne jest, aby graniczna temperatura powietrza na etapie rozładowywania nie była wyższa od temperatury krytycznej z punktu widzenia bezpiecznej eksploatacji zbiornika podziemnego, co jest dyktowane termowyttrzymałością zastosowanych w jego konstrukcji materiałów. Powietrze na

etapie rozładowywania zbiornika przepływa przez zasobnik ciepła przejmując ciepło od materiału akumulacyjnego i jako gorące wyprowadzone jest do zespołu ekspandera systemu CAES rurociągiem z zabudowanym zaworem odcinającym 1. Górna pokrywa zbiornika 5 wyposażona jest dodatkowo we właz rewizyjny 4, umożliwiając dokonywanie przeglądów zbiornika oraz przeprowadzanie zabiegów remontowych. Korzystne jest zastosowanie na wypełnienie zasobnika ciepła odpowiedniego materiału akumulacyjnego, o odpowiedniej objętości, umożliwiającej przejście ilości ciepła, decydującej o wysokim stopniu wychłodzenia zmagazynowanego powietrza, jakie wyprowadzane jest z zasobnika ciepła. Ograniczenie temperatury powietrza mającego kontakt z obudową zbiornika podziemnego skutkowało będzie ograniczeniem strat ciepła do otoczenia magazynu powietrza sprężonego i na skutek tego zwiększoną sprawnością magazynowania energii systemu CAES. Korzystne jest zastosowanie odpowiedniej geometrii kanałów przepływowych w objętości materiału akumulacyjnego, gwarantującej wysoką skuteczność przekazywania ciepła, przy równocześnie niskich oporach przepływu. Korzystne jest zastosowanie izolacji termicznej, jako poszycia elementów zasobnika ciepła, gwarantujących minimalizację strumienia ciepła przekazywanego od materiału akumulacyjnego do powietrza wychłodzonego, zgromadzonego w podziemnym magazynie, poza objętością zasobnika ciepła. Korzystne jest skrócenie czasu magazynowania sprężonego powietrza, a więc i magazynowania ciepła wysokotemperaturowego, co umożliwi minimalizację ilości ciepła przekazanego od materiału akumulacyjnego do powietrza zgromadzonego w podziemnym magazynie, poza objętością zasobnika ciepła.

Zaletą rozwiązania według wynalazku jest możliwość jego adaptacji dla zorganizowania wysokoefektywnego zbiornika ciśnieniowego w objętości poeksploatacyjnego szybu kopalnianego. Możliwe jest wykorzystanie i zaadoptowanie jako magazynów energii sprężonego powietrza istniejących szybów górniczych w kopalniach podlegających likwidacji. Zazwyczaj wraz z decyzją o zamknięciu kopalni lub jej części zapada decyzja o likwidacji szybów, które odbywają się przez budowę tam na tzw. podszybiach, czyli miejscach połączenia szybu z głównymi wyrobiskami poziomymi i późniejsze zasypanie wnętrza szybów różnego rodzaju kruszywem i przykryciu żelbetowymi płytami na powierzchni terenu. W ten sposób wyrobiska te, których koszty drażenia i wyposażenia liczone są co najmniej w setkach milionów złotych są bezpowrotnie traczone i niemożliwe jest ich jakiegokolwiek (w tym gospodarcze) ponowne wykorzystanie. Szyb jest najważniejszym wyrobiskiem każdej kopalni i dbałość o jego stan (obudowy, wyposażenia)

jest priorytetowa przez cały okres funkcjonowania każdego zakładu górniczego i nieporównywalna z jakimkolwiek innym wyrobiskiem podziemnym. Alternatywna do zasypania decyzja o budowie magazynu czystej energii sprężonego powietrza w szybie kopalnianym, będąca przedmiotem niniejszego zgłoszenia, na etapie decyzji o likwidacji kopalni pozwala na wykorzystanie istniejącej w dobrym stanie infrastruktury w sposób podnoszący bezpieczeństwo systemu elektroenergetycznego kraju, a przez to stanowi modelowy przykład rewitalizacji terenów pogórnich.

Szczególnie korzystna może być budowa opisywanego magazynu energii w sprężonym powietrzu w tych lokalizacjach, gdzie w najbliższym sąsiedztwie likwidowanej kopalni lub jej części z wyrobiskiem/wyrobiskami szybowymi znajduje się przemysłowy producent energii elektrycznej (elektrownia konwencjonalna). W wielu przypadkach, także w Polsce, można wskazać takie lokalizacje.

Szyb górniczy zabezpieczony jest przed destrukcyjnym oddziaływaniem ciśnienia górotworu (naprężeń w skałach) różnego typu obudową (najczęściej grubościenną z betonu zbrojonego lub segmentową z żelbetowych tubingów grubościennych), co zapewnia jego stateczność. Sprężone powietrze w jego wnętrzu, o zakresie ciśnień stosowanych w tego typu instalacjach, wywierać będzie nacisk na obudowę w kierunku przeciwnym do oddziaływania górotworu, wobec czego nie tylko nie będzie sumować się z oddziaływaniem masywu skalnego, lecz przeciwnie, będzie przeciwdziałać jego oddziaływaniu hamując konwergencję wyrobiska. Ze względu na to, że - w zależności od głębokości- ciśnienie górotworu oddziałujące na obudowę przyjmuje wartości zbliżone do oddziałującego w odwrotnym kierunku ciśnienia sprężonego powietrza, np. przykładowo na głębokości 400m - ok. 10 MPa, przewiduje się że nie będzie potrzeby instalowania dodatkowej obudowy na znacznej długości (głębokości) przyszłego magazynu sprężonego powietrza, a jedynie jej dodatkowe uszczelnienie elastyczną powłoką. Obudowa szybowa, w przeciwieństwie do obudowy znakomitej większości pozostałych wyrobisk górniczych, projektowana jest i wykonywana jako stosunkowo szczelna (ze względu na wody warstw wodonośnych w górotworze, często pod ciśnieniem), co stanowi kolejną zaletę proponowanego rozwiązania. Ponadto temperatura skał w górotworze rośnie wraz z głębokością, np. w warunkach większości polskich kopalń o ok. 3 °C na każde 100 m głębokości, tak więc na głębokości 1000 m wynosi grubo ponad 30 °C i jest stała, stąd przenikanie ciepła z magazynu będzie ograniczone.

Szyby górnicze na powierzchni głównej kopalni drążone są co najmniej w parach, a najczęściej jako trzy lub nawet cztery (lub nawet więcej, aczkolwiek rzadko) blisko

położonych wyrobisk. Wyrobiska te odległe od siebie o kilkadziesiąt metrów połączone są na kilku poziomach pod powierzchnią terenu. Połączenia te realizowane są poprzez otwieralne tamy lub grodzie lub istnieje możliwość ich łatwej instalacji. W bardzo wielu likwidowanych kopalniach groźba zalania sąsiednich, czynnych zakładów górniczych (połączonych hydraulicznie przez spękany maszyn skalny) wymusiła, wymusza i wymusić będzie w przyszłości pozostawienie przynajmniej jednego szybu w celu pompowania wody. Koszty pompowania i utrzymywania infrastruktury szybu w zlikwidowanych kopalniach ponosi Skarb Państwa. Likwidacja pompowni możliwa jest dopiero po likwidacji ostatniej kopalni w całym rejonie eksploatowanego zagłębia. Budowa magazynu energii w jednym z szybów na powierzchni głównej przy istnieniu sąsiedniego wyrobiska szybowego, przeznaczonego do pompowania wody, znacznie ułatwia proces adaptacji/budowy magazynu energii i dostęp do prac remontowych, czy wizyt kontrolnych.

Zdecydowana większość szybów górniczych jest uzbrojona, to znaczy posiada różnego typu wyposażenie, które znacząco może ułatwić budowę i konserwację/remonty podczas użytkowania podziemnego magazynu energii w sprężonym powietrzu. Do wyposażenia tego należą m. in. wieże szybowe z maszynami wyciągowymi, stalowe prowadniki służące jako prowadnice naczyń wyciągowych/klatek szybowych, ewakuacyjne przedziały drabinowe na całej długości szybu, różnego typu rurociągi (wodne, odmetanowania, przeciwpożarowe, itp.), kable elektryczne, telefoniczne, często także światłowody. Wykorzystanie tej infrastruktury, często inaczej bezużytecznej, obniżyć może także koszty budowy i użytkowania magazynu. Istnieją jednak, w znacznej mniejszości w ogólnej liczbie, również szyby nieuzbrojone, to znaczy takie, w których wnętrzach nie zainstalowano żadnego dodatkowego wyposażenia (poza obudowę samego szybu). Wyrobiska szybowe tego typu pełnią funkcje wentylacyjne (służą do odprowadzania tzw. zużytego powietrza lub doprowadzania powietrza świeżego) i znaczna ich część występuje na krańcach danego obszaru górniczego. Szyb prezentowany na rysunku poniżej należy do tej kategorii, brak uzbrojenia szybu nie oznacza bowiem braku możliwości jego adaptacji na cele magazynowania, niesie tylko ze sobą innego rodzaju wymagania dotyczące procesu jego adaptacji i późniejszego użytkowania jako magazynu energii w sprężonym powietrzu.

Koszty związane z zabiegami uszczelniającymi obmurze szybu celem dostosowania do magazynowania wysokociśnieniowego powietrza mogą być akceptowalne w stosunku do kosztów wymaganych dla budowy np. kawerny solnej. Zabudowa zbiornika według wynalazku może być przeprowadzona w lokalizacjach, w których nie ma stosownych

warunków geologicznych dla budowy kavern solnych, ale są zlokalizowane poeksploatacyjne obiekty górnicze. Adaptacja takiej infrastruktury może być interesującą opcją dla rewitalizacji terenów górniczych. Konstrukcja zbiornika z zabudowanym wewnątrz zasobnikiem ciepła wysokotemperaturowego pozwoli na wyeliminowanie potrzeby zabudowy w ramach adiabatycznego systemu CAES przeponowych wymienników ciepła, koniecznych dla chłodzenia powietrza wprowadzanego do zbiornika ciśnieniowego. Wynalazek jest ciekawą alternatywą dla zastosowania naziemnych zasobników ciepła, gdzie wymagane jest zastosowanie grubościennych obudów zasobników. Usytuowanie zasobnika w przestrzeni zbiornika pozwala zniwelować straty rozpraszane ciepła do otoczenia magazynu – ciepło przewodzone przez izolację termiczną zasobnika przejęte zostanie w pierwszej kolejności przez powietrze zgromadzone w zbiorniku podziemnym i w istotnej części zostanie efektywnie wykorzystane w zespole ekspandera powietrznego.

KATEDRA ENERGETYKI  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ  
SIGMUND KLIMASZKO  
