

**Leszek Pająk\*, Andrzej Gonet\*\*, Tomasz Śliwa\*\*, Dariusz Knez\*\***

## **ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA MAGAZYNÓW CIEKŁEGO PROPANU, LOKOWANYCH W STREFIE KAWERN WYSADÓW SOLNYCH, DO PRODUKCJI ENERGII\*\*\***

### **1. WSTĘP**

Magazynowanie węglowodorów w strukturach solnych jest dość szeroko opisywane w literaturze (np.: [2, 9]). W Polsce istnieją instalacje komercyjne wykorzystujące jako magazyny kawerny lokowane w wysadach solnych Mogilno i Góra koło Inowrocławia [9, 5]. W budowie jest magazyn niedaleko Gdyni. Głównym celem tych instalacji jest okresowe magazynowanie paliw, są one zatem ukierunkowane na magazynowanie energii chemicznej charakteryzującej paliwa. Kawerny magazynowe wykonywane są w szerokim interwale głębokości, od ok. 250 do prawie 2000 m [2]. W Polsce zakres ich lokowania jest podobny [9]. Ze względu na wysokie wartości współczynnika przewodzenia ciepła soli kamiennej (od ok. 4 do 6 W/(mK), na podstawie [8]) wysady solne charakteryzują się anomalnym rozkładem temperatur w stosunku do skał otoczenia. W strefie powierzchniowej, w której lokuje się kawerny, strefa wysadu charakteryzuje się podwyższonymi temperaturami [3]. Oznacza to wyższą naturalną temperaturę struktur solnych w odniesieniu do otoczenia, a co za tym idzie wyższą temperaturę magazynowanych w nich mediów. Na głębokości rzędu 500 m spodziewać się można temperatur rzędu 30°C, na 1 km ok. 50°C, a na 2 km ok. 70–80°C [3]. Największą termiczną anomalią charakteryzują się warstwy ulokowane bliżej powierzchni – zaraz pod czapą wysadu [3]. Obok energii chemicznej magazyny płynnych paliw mogą być zatem nośnikami zakumulowanej w nich energii cieplnej. Dodatkowo w przypadku magazynowania gazów (zarówno w fazie gazowej, jak i ciekłej) potencjalnie możliwy do wykorzystania jest efekt lokalnego znacznego obniżenia temperatury. Jest on wywołany przez

---

\* Zakład Energii Odnawialnej, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, pajak@meeri.pl

\*\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków, sliwa@agh.edu.pl

\*\*\* Praca powstała w ramach grantu rozwojowego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr R09 00503

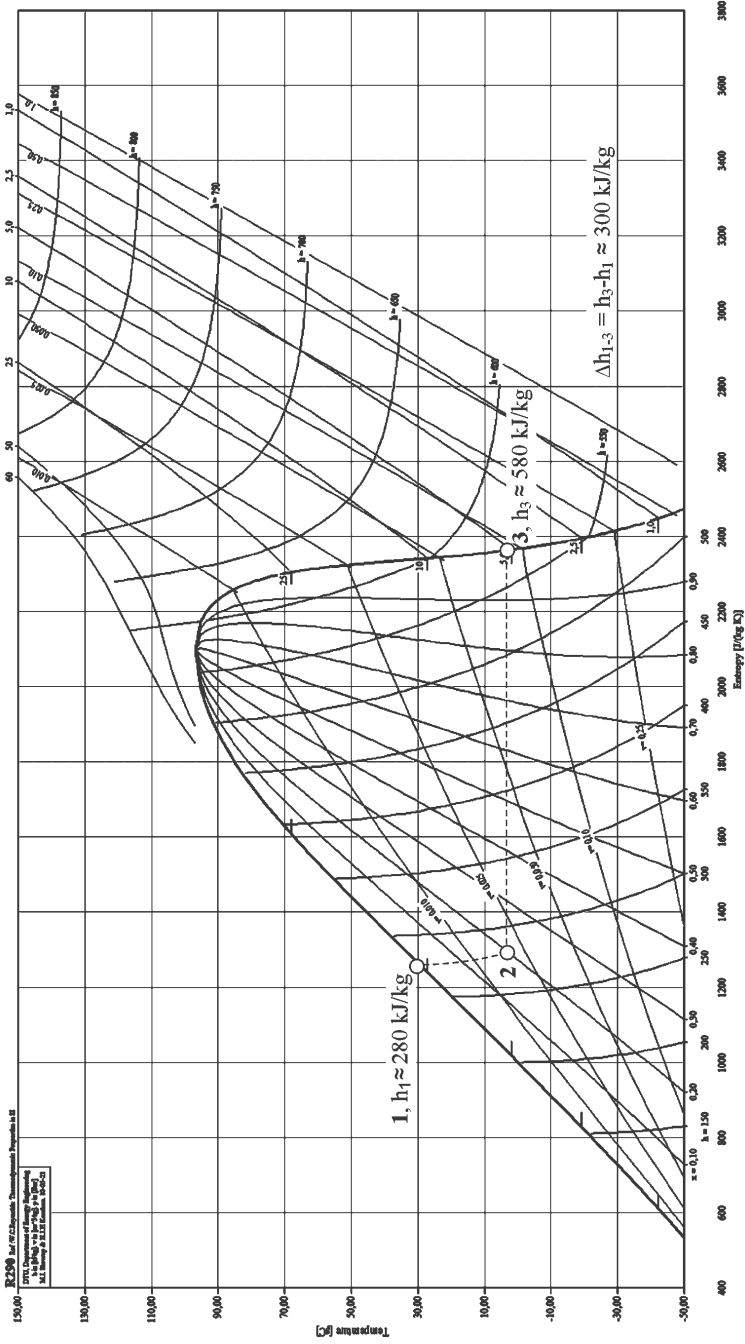
rozprężanie gazu w przypadku fazy gazowej lub jego odparowania i przejścia z fazy ciekłej w fazę gazową w przypadku magazynowania gazów skroplonych. Takie źródło anomalnie obniżonej temperatury mogłoby być wykorzystane wprost do chłodzenia (np. instalacje klimatyzacyjne) lub jako źródło niskotemperaturowe przejmujące energię ze skraplacza elektrowni (rozpraszana zazwyczaj w atmosferze przy wykorzystaniu chłodni wentylatorowych lub kominowych). O wykorzystaniu kawern w wysadach solnych do pozyskiwania ciepła pisano m.in. [10].

Opisane tu potencjalne alternatywne sposoby wykorzystania magazynów mogą mieć, zdaniem autorów, sens techniczny i ekonomiczny jedynie jako działalność dodatkowa – prowadzona przy okazji głównego wykorzystania magazynów, jakim pozostanie oczywiście magazynowanie paliw. Kluczowe znaczenie dla możliwości alternatywnego wykorzystania magazynów paliw lokowanych w kawernach ma harmonogram ich użytkowania. Harmonogram ten może być zdecydowanie zróżnicowany, zależnie od przeznaczenia magazynów i sposobu ich wykorzystania. Stosując nomenklaturę zaproponowaną w literaturze [6], można stwierdzić, że najbardziej do alternatywnych sposobów wykorzystania magazynów nadają się magazyny sezonowe (zadaniem ich jest wyrównanie sezonowej podaży i popytu na paliwa) i szczytowe (zadaniem ich jest wyrównanie szczytowego popytu na paliwa). Magazyny te cechuje przewidywalność harmonogramu pracy oraz duża częstość napełniania i opróżniania.

Kluczowe znaczenie dla procesu odzysku energii z podziemnych magazynów ciekłego propanu mają jego właściwości fizyczne. Propan techniczny jest bezbarwnym i bezwonny gazem o temperaturze wrzenia około  $-42^{\circ}\text{C}$  [1] przy ciśnieniu zbliżonym do atmosferycznego [4]. Wykazuje on prężność w temperaturze pokojowej wynoszącą 0,83 MPa. Temperatura krytyczna propanu technicznego wynosi  $96,7^{\circ}\text{C}$ . Gęstość skroplonego propanu technicznego w temperaturze wrzenia ( $-42,05^{\circ}\text{C}$ ) wynosi  $580\text{ kg/m}^3$ . W temperaturze  $15^{\circ}\text{C}$ , przy ciśnieniu 1013 hPa w fazie gazowej stosunek gęstości propanu do gęstości powietrza wynosi 1,55 (jest to zatem gaz znacznie cięższy od powietrza). Na rysunku 1 zamieszczono wykres  $t-s$  (temperatura–entropia) dla propanu (źródło: *Baza danych dotyczących czynników chłodniczych programu CoolPack* wersja 1.46).

Proces wykorzystania ciekłego propanu jako paliwa wiąże się z jego rozprężeniem i przejściem z fazy ciekłej do fazy gazowej, która ulega spalaniu. Rozprężaniu ciekłego propanu towarzyszy gwałtowny spadek temperatury. Wartość do jakiej spada temperatura mieszaniny fazy ciekłej i gazowej uzależniona jest od ciśnienia do jakiego rozprężany jest skroplony gaz. W rozwiązaniach technicznych (przy temperaturach powyżej  $0^{\circ}\text{C}$  w celu uniknięcia zarastania lodem elementów instalacji), niezależnie od wymaganego końcowego ciśnienia fazy gazowej, zawsze wymagane jest doprowadzenie znacznych ilości energii związanych z odparowaniem fazy ciekłej i przejściem jej w fazę gazową. Taki mechanizm sugeruje ukierunkowanie kawern magazynowych bardziej jako potencjalnego źródła niskich niż wysokich temperatur. Na ten właśnie kierunek rozwoju zwrócono w pracy szczególną uwagę. Ostatecznie analizowano trzy warianty wykorzystania kawern magazynowych ciekłego propanu:

- wariant odzysku energii cieplnej;
- wariant wykorzystania procesu przejścia propanu z fazy ciekłej do fazy gazowej, z równoczesną redukcją ciśnienia, do chłodzenia lub klimatyzacji;
- wariant wykorzystania procesu przejścia propanu z fazy ciekłej do fazy gazowej, z równoczesną redukcją ciśnienia, do skraplania czynnika roboczego w instalacji siłowni.

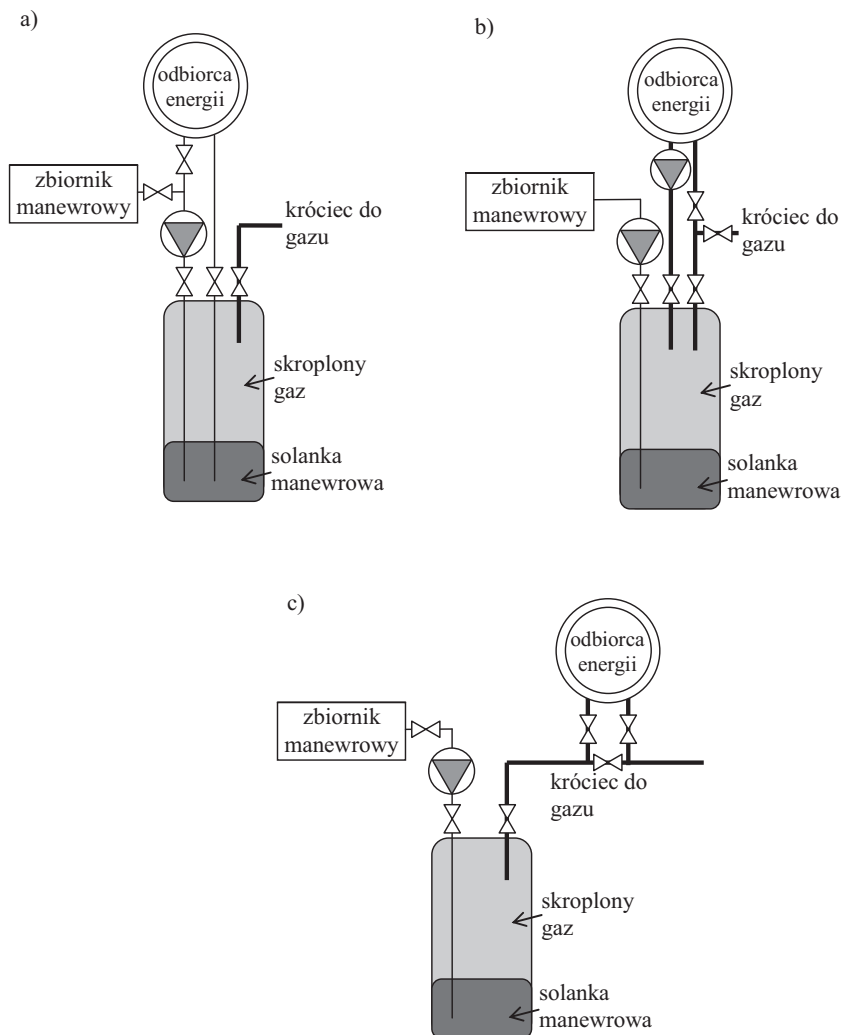


Rys. 1. Wykres  $t-s$  dla propanu (źródło: Baza danych dotyczących czynników chłodniczych programu CoolPack wersja 1.46)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pkt. 1 odpowiada parametrom na wyjściu ciekłego propanu z kawerny magazynowej ( $p_1 = 1,1$  MPa,  $t_1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $x_1 = 0$ ). Pkt. 2 parametry propanu po rozprężeniu do  $p_2 = 0,5$  MPa,  $t_2 \approx 2^\circ\text{C}$  przy stopniu suchości  $x_2 = 0,2$ . Pkt. 3 parametry propanu rozprężonego do parametrów docelowych  $p_3 = 0,5$  MPa,  $t_3 \approx 2^\circ\text{C}$ , przy stopniu suchości  $x_3 = 1$

## 2. WYKORZYSTANIE KAWERN MAGAZYNOWYCH CIEKŁEGO PROPANU JAKO ŹRÓDŁA ENERGII CIEPLNEJ

Wykorzystanie kawern magazynowych ciekłego propanu jako źródła energii cieplnej może być rozważane w kilku konfiguracjach, które zaprezentowano na rysunku 2a, b i c. Konfiguracja z rysunku 2a dotyczy wykorzystania energii magazynowanej w solance manewrowej. Wariant ten przewiduje możliwość ciągłej cyrkulacji solanki manewrowej i odbioru energii w niej magazynowanej (bezpośrednio lub przy wykorzystaniu pomp ciepła).



**Rys. 2.** Schematy możliwych wariantów wykorzystania komór magazynowych w celu wykorzystania energii akumulowanej w: solance manewrowej a) lub skroplonym gazie b) i c)

Eksploatacja takiej instalacji wiąże się z niebezpieczeństwem ciągłego ługowania strefy dna komory i wytrącania części stałych na wymiennikach, którymi przepływa ochładzana solanka. Obydwa procesy są niekorzystne w związku z eksploatacją komory i samą instalacją powierzchniową. Dodatkowo wymagane jest wykonanie otworu umożliwiającego cyrkulację solanki, co podnosi konieczne nakłady inwestycyjne.

Alternatywnym sposobem ciągłej eksploatacji energii cieplnej ze strefy komory jest wykorzystanie jako nośnika energii pośredniczącego w wymianie ciepła na drodze ściany wysadu–odbiorca energii samego skroplonego gazu (rys. 2b). Ciekły propan nie wykazuje korozyjnego działania na elementy konstrukcyjne instalacji wykonane ze stali. Nie ma również niebezpieczeństwa niekontrolowanego ługowania komory, ponieważ sól tworząca ściany komory nie rozpuszcza się w ciekłym propanie. Problemem jest konieczność utrzymania cyrkulacji w instalacji powierzchniowej substancji skrajnie łatwopalnej. Do tego dochodzi, podobnie jak poprzednio, konieczność wykonania dodatkowego otworu cyrkulacyjnego.

Niezależnie od wspomnianych problemów w obu przypadkach możliwość osiągnięcia wymaganej mocy grzewczej instalacji i temperatury medium roboczego dostarczanego odbiorcy są silnie limitowane wymianą ciepła przez przewodzenie w sąsiedztwie ścian komory magazynowej. Dane literaturowe [7] dotyczące symulacji pozyskania energii z kawern lokowanych w wysadach solnych potwierdzają możliwość osiągania z pojedynczej kawerny stabilnej mocy rzędu do kilkuset kW (przy eksploatacji ciągłej z mocną nominalną do ok. 100 kW [7]). Osiągane temperatury uzależnione będą oczywiście od głębokości lokacji komór. Można jednak zakładać, że w celu użytecznego wykorzystania energii konieczne będzie zastosowanie pomp ciepła, co dodatkowo podniesie nakłady inwestycyjne i wymagało będzie konsumpcji energii napędowej.

Rysunek 2c przedstawia propozycję schematu cyklicznego wykorzystania energii cieplnej gazu magazynowanego w komorze w okresach jej opróżniania i ładowania. Zaletą tego wariantu jest brak ingerencji w technologiczny układ magazynu, znaczącą wadą jest uzależnienie pozyskania energii od cyklu roboczego komory magazynowej i prawdopodobieństwo wystąpienia dużych potencjalnie możliwych do wykorzystania mocy w krótkich okresach czasu.

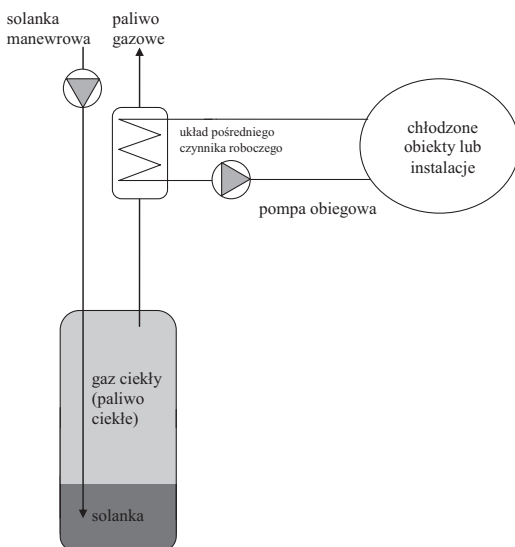
Ostatecznie celowość stosowania odzysku energii cieplnej akumulowanej w mediach wypełniających komory magazynowe winna być każdorazowo oceniana pod kątem opłacalności, w przypadku której równie duży wpływ ma charakterystyka odbiorcy, co charakter źródła energii.

### **3. WYKORZYSTANIE KAWERN MAGAZYNOWYCH W SYSTEMACH CHŁODZENIA**

Jeżeli docelowy sposób zagospodarowania ciekłego propanu wymagałby jego zamiany w gaz, to okazać się może, że skroplony gaz może być wartościowym źródłem odprowadzania znacznych ilości energii i to przy stosunkowo niskich temperaturach, np. w przypadku instalacji chłodzenia (w klimatyzacji lub w procesach technologicznych). Przykładowo przy redukcji ciśnienia skroplonego propanu z warunków składowania przy ciśnieniu 1,1 MPa (30°C, pkt 1 – rys. 1) do ciśnienia końcowego fazy gazowej 0,5 MPa (~2°C, pkt 3 – rys. 1),

przy założeniu wstępnej fazy rozprężania do stopnia suchości 0,2 (pkt 2 – rys. 1), całkowita zamiana fazy ciekłej w fazę gazową wymaga doprowadzenia energii w ilości ok. 300 kJ/kg. Znając potencjalną produktywność zbiornika (wyrażoną np. w kg/s), można, na tej podstawie, określić potencjalną moc chłodniczą.

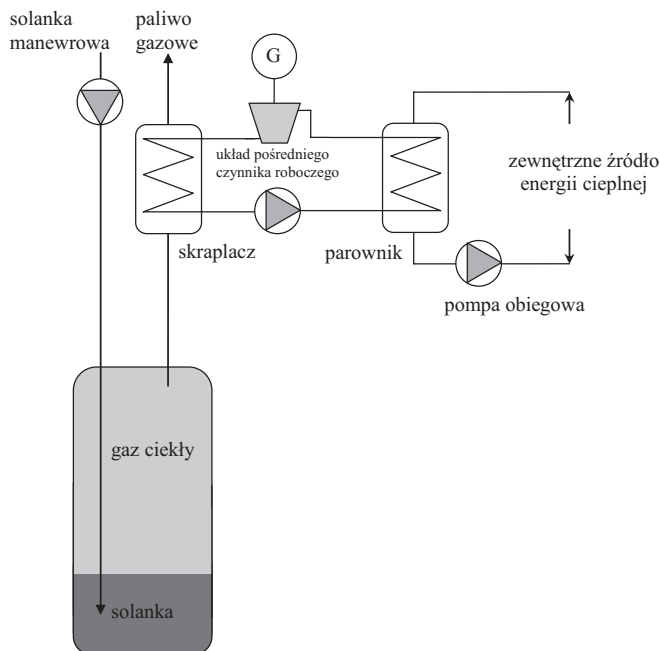
Na rysunku 3 przedstawiono technologiczny schemat wykorzystania magazynów kawernowych do chłodzenia. Głównym elementem tej instalacji jest wymiennik ciepła, w którym następuje częściowe rozprężenie i odparowanie ciekłego propanu. Aspekty techniczne sugerują, by proces ten nie zachodził w temperaturach poniżej 0°C, przede wszystkim dlatego, że redukujemy wówczas zbyt mocno ciśnienie powstałego gazu, co może wymagać jego ponownej kompresji – nie jest to energetycznie uzasadnione. Przekroczenie bariery 0°C w przypadku elementów instalacji kontaktujących się z wodą lub powietrzem atmosferycznym wywołać może dodatkowo problemy związane z ich obładaniem.



**Rys. 3.** Schemat instalacji wykorzystującej odparowanie ciekłego gazu magazynowanego w kawernie do chłodzenia

#### 4. WYKORZYSTANIE KAWERN MAGAZYNOWYCH DO PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Wykorzystanie kawern magazynowych do produkcji energii elektrycznej wiąże się ze specjalnym sposobem wykorzystania ich potencjału chłodniczego, o czym wspomniano w poprzedniej części. Potencjał chłodniczy jest tu wykorzystywany do skraplania czynnika roboczego, który odparowywany jest w wyższych temperaturach (dzięki energii pobieranej z zewnętrznego źródła energii). Schemat instalacji przedstawia rysunek 4.

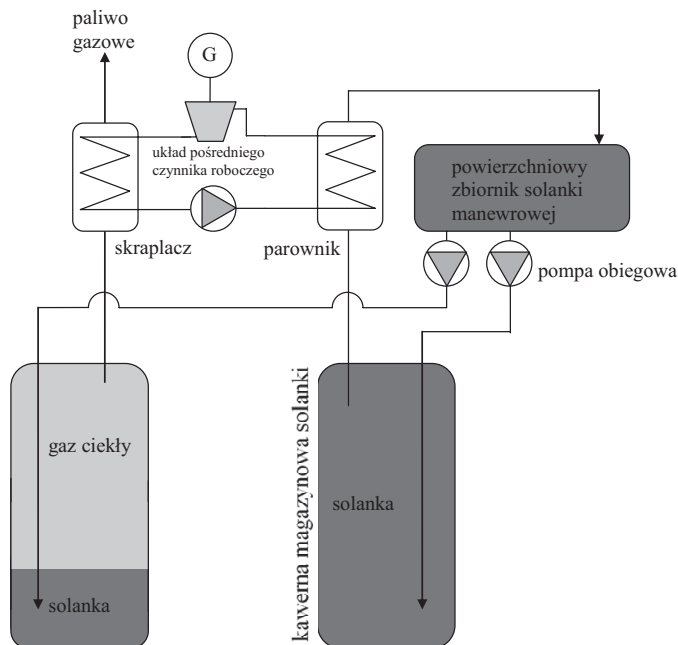


**Rys. 4.** Schemat elektrowni wykorzystującej odparowanie ciekłego gazu magazynowanego w kawernie i niskotemperaturowego zewnętrznego źródła energii

Przykładem takiego źródła może być energia geotermalna. Może ona pochodzić z innych kawern wykonanych w sąsiedztwie. Propozycję schematu pracy takiego układu przedstawiono na rysunku 5. Instalacja składa się z dwóch komór magazynowych: w jednej zmagazynowany jest skroplony gaz, w drugiej solanka stanowiąca źródło energii wykorzystywanej do odparowywania czynnika roboczego. Skroplony gaz przepływa przez skraplacz czynnika roboczego siłowni, w urządzeniu tym następuje wymiana ciepła między skraplanym czynnikiem roboczym a ciekłym propanem. Ciekły propan przejmuje ciepło od skraplanego czynnika roboczego. Dzięki tej energii oraz stopniowemu rozprężeniu następuje odparowanie skroplonego propanu.

Przez parownik siłowni przepływa solanka manewrowa magazynowana w kawernie magazynowej wchodzącej w skład układu. W parowniku następuje oddanie energii zakumulowanej w solance odparowywanemu czynnikowi roboczym. Po schłodzeniu solanka kierowana jest do zbiornika manewrowego, z którego pobiera się odpowiednią jej ilość do wypompowania z kawern ciekłego gazu i służącą jako źródło energii (solanka manewrowa wypycha z kawern te media). Okresowa eksploatacja układu sprzyja wygrzaniu solanki w kawernie magazynowej. Osiągnięcie maksymalnie wysokiej temperatury solanki ma duże znaczenie w związku ze sprawnością konwersji energii cieplnej w energię elektryczną produkowaną przez układ i jego mocą. Niestety sprawność turbiny (wyrażona stosunkiem

konwersji energii wynikającej z różnicy ciśnień w energię mechaniczną przekazywaną wałowi generatora) spada wraz ze spadkiem różnicy ciśnień między parownikiem a skraplaczem (różnica ciśnień wywołana jest przez różnicę temperatur).



**Rys. 5.** Schemat elektrowni wykorzystującej odparowanie ciekłego gazu magazynowanego w kawernie oraz dodatkowej kawerny akumulującej energię cieplną

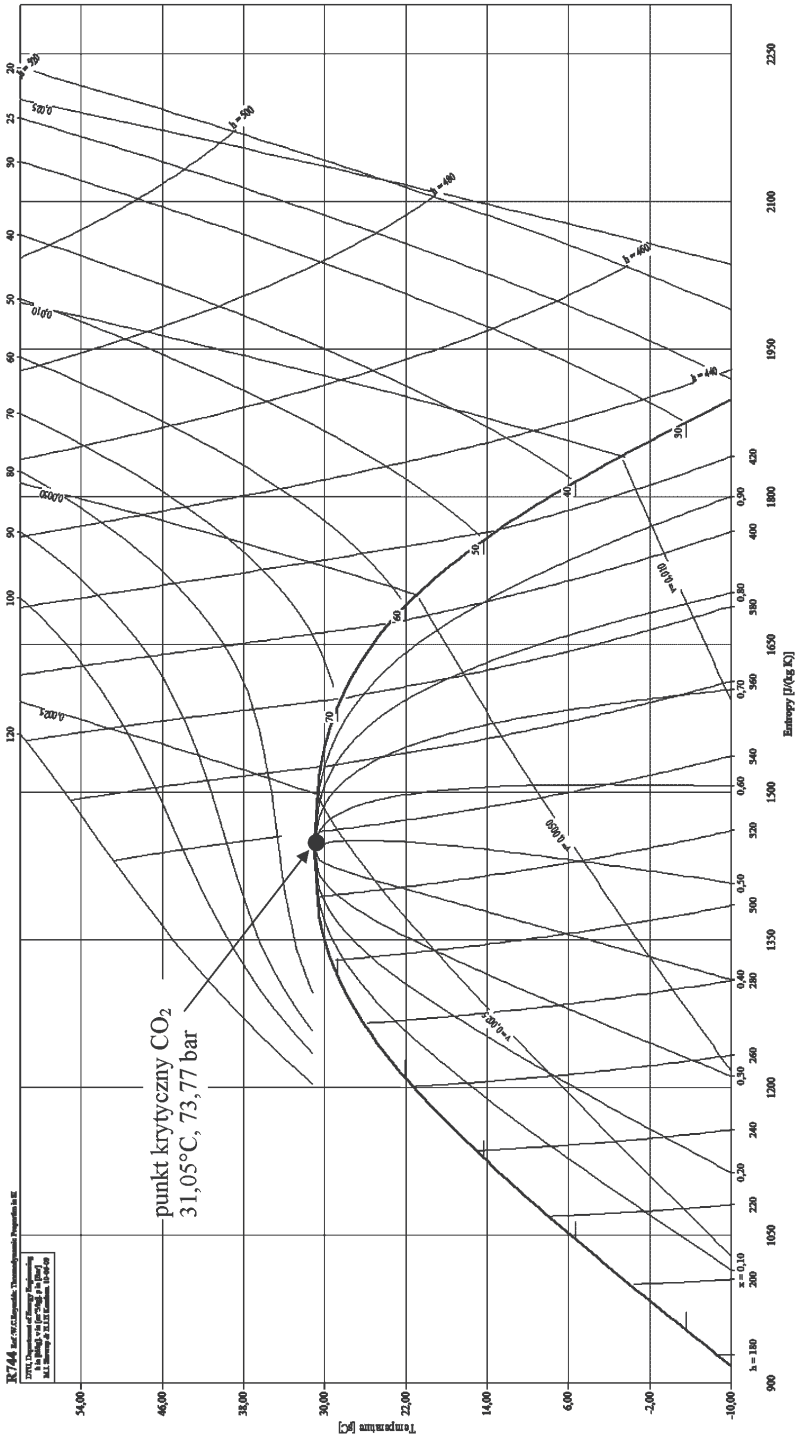
Warto tu zauważyć, że zastępując zbiornik manewrowy dodatkową kawerną magazynową, można prowadzić naprzemienną eksploatację układu solanki roboczej, co winno sprzyjać jej lepszemu wygrzaniu w kawernach.

Dzięki odpowiedniemu doborowi czynnika roboczego można starać się znacząco zredukować zapotrzebowanie na różnicę temperatur między parownikiem a skraplaczem instalacji. Właściwościami termodynamicznymi odpowiednimi do stworzenia układu w omawianym przypadku cechuje się np. dwutlenek węgla. Na rysunku 6 przedstawiono wykres  $t-s$  dla  $\text{CO}_2$ . Dwutlenek węgla charakteryzuje się stosunkowo niską temperaturą krytyczną<sup>2</sup> wynoszącą  $31,05^\circ\text{C}$  i wysokim ciśnieniem krytycznym  $7,377\text{ MPa}$ . Z rysunku 6 wynika, że realne jest użycie tego czynnika roboczego w warunkach nadkrytycznych<sup>3</sup> w dość niskich temperaturach.

<sup>2</sup> Temperatura krytyczna jest to temperatura, powyżej której substancja nie występuje w fazie ciekłej – niezależnie od ciśnienia pod jakim się znajduje. Temperaturze krytycznej przypisane jest w przypadku danej substancji określone ciśnienie, ciśnienie to określa się mianem ciśnienia krytycznego.

<sup>3</sup> Warunki nadkrytyczne dla danej substancji panują powyżej temperatury i ciśnienia krytycznego.





Rys. 6. Wykres  $t-s$  dla dwutlenku węgla (źródło: Baza danych dotyczących czynników chłodniczych programu CoolPack wersja 1.46)

Trzeba się jednak liczyć z tym, że instalacja, w której krążyć będzie dwutlenek węgla, musi być instalacją wysokociśnieniową, co niewątpliwie wpłynie na wzrost nakładów inwestycyjnych. Zakładając temperaturę pary suchej CO<sub>2</sub> na poziomie 30°C, uzyska się w parowniku instalacji (rys. 4 lub 5) ciśnienie ok. 72 bary. Jeżeli skraplanie CO<sub>2</sub> będzie następować w temperaturze ok. 6°C (temperaturę tę osiągnie się przy rozprężaniu i odparowaniu ciekłego propanu), uzyska się ciśnienie ok. 41 bar. Ta różnica ciśnień, rzędu 30 bar, może być wykorzystana do napędu turbiny współdziałającej z generatorem.

## 5. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie energii związanej z magazynowaniem ciekłego propanu w kawernach lokowanych w wysadach solnych analizowano w trzech kierunkach: do produkcji energii cieplnej, do chłodzenia i klimatyzacji oraz do produkcji energii elektrycznej. Na podstawie przeprowadzonych rozważań można domniemać, że najlepszych efektów spodziewać się można w przypadku wykorzystania instalacji kawern magazynowych do zaspokojenia zapotrzebowania na chłód. Interesująca wydaje się również produkcja energii elektrycznej przy wykorzystaniu potencjału chłodniczego do skraplania czynnika roboczego siłowni binarnej. Analizowano wykorzystanie dwutlenku węgla jako czynnika roboczego takiej siłowni.

Promowanie wykorzystania chłodu wynika z faktu konieczności stosowania w porównawczych rozwiązaniach standardowych odpowiednich, dość drogiej na etapie inwestycji i eksploatacji, technologii (pompy ciepła). Dość wymagający poziom odniesienia w przypadku rozwiązań standardowych może pozwolić uzyskać dobre wyniki w przypadku rozwiązań proponowanych, pozwalając nowym rozwiązaniom konkurować ze standardowymi na płaszczyźnie ekonomicznej i energetycznej. Proponowane rozwiązania nie wykorzystują pomp ciepła, bazują na wykorzystaniu efektu chłodzącego związanego z rozprężaniem i odparowaniem ciekłego propanu. Oczywiście ważnym problemem pozostaje zbywalność chłodu, czyli sąsiedztwo odbiorcy. Ze względu na to, że magazyny lokowane są raczej w strefach o niewielkiej gęstości zaludnienia i w oddaleniu od odbiorców sensowne wydaje się wykorzystanie chłodu do klimatyzacji obiektów biurowych lub do prowadzenia działalności gospodarczej cechującej się znacznym zapotrzebowaniem na chłód (np. chłodnie).

Druga z propozycji wykorzystania chłodu uniezależnia instalację od konieczności współpracy z odbiorcą. Chłód wykorzystywany jest do produkcji energii elektrycznej, a konkretnie do skraplania czynnika roboczego w siłowniach binarnych. Dzięki niskiemu poziomowi temperaturowemu (prognozuje się, że można będzie osiągnąć poziom rzędu +2°C) instalacja taka może wykorzystać niskotemperaturowe źródło napędowej energii cieplnej. Energia ta może pochodzić z komór magazynowych solanki manewrowej współpracujących w odpowiednim systemie z instalacją. Przeanalizowano i zaproponowano wykorzystanie dwutlenku węgla jako czynnika roboczego w takiej siłowni. Wszystkie opisane i rozważane rozwiązania zmierzają do wykorzystania specyfiki związanej z magazynowaniem paliw w kawernach magazynowych. Prowadzenie działalności, której celem byłaby jedynie produkcja energii – z pominięciem magazynowania paliw – nie byłoby, zdaniem autorów, uzasadnione ekonomicznie.

## LITERATURA

- [1] *Karta charakterystyki preparatu propan techniczny. Dokument sporządzony z wymogami MZ z dnia 13 listopada 2007* (Dz.U. 07.215.1588), BałtykGaz, 2009
- [2] Berest P., Brouard B.: *Safety of salt caverns used for underground storage*. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, 2003, 58: 361–384
- [3] Bujakowski W. (red.): *Termiczna charakterystyka górotworu w rejonie wysadów solnych*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 2003
- [4] CoolPack wersja 1.46. Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark
- [5] Kunstman A., Poborska-Młynarska K., Urbańczyk K.: *Zarys otworowego ługownictwa solnego*. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2002
- [6] Kunstman A., Poborska-Młynarska K., Urbańczyk K.: *Geologiczne i górnicze aspekty budowy magazynowych kawern solnych*. „Przegląd Geologiczny” 2009, vol 57, nr 9 819–828.
- [7] Pająk L.: *Thermal energy exploitation from salt domes*, Proceedings World Geothermal Congress 2005, paper no 1145. Antalya – Turkey
- [8] Plewa S.: *Rozkład parametrów geotermalnych na obszarze Polski*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków 1994
- [9] Ślizowski J.: *Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazu ziemnego w złożach soli kamiennej*, Studia Rozprawy Monografie nr 137/2006. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków 2006
- [10] Śliwa T.: *Wybrane systemy geotermalne w skałach suchych*, materiały konferencyjne „Aktualny stan i perspektywy rozwoju górnictwa w aspekcie ochrony środowiska”, Państwowa Akademia Górnicza Ukrainy w Dniepropietrowsku, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Dniepropietrowsk – Kraków 1996