

**Władysław Duliński\*, Czesława Ewa Ropa\***

**ANALIZA TECHNICZNO-ENERGETYCZNA  
ZAGOSPODAROWANIA DWUTLENKU WĘGLA  
W UZDROWISKU KRYNICA ZDRÓJ**

**1. WSTĘP**

Zastosowanie dwutlenku węgla na szeroką skalę sprawia, że w praktyce wykorzystywany jest zarówno CO<sub>2</sub> pozyskiwany ze źródeł naturalnych, jak i otrzymywany sztucznie w różnych procesach technologicznych. Tendencja powrotu w ostatnim okresie do zastosowań CO<sub>2</sub> ze źródeł naturalnych, w szczególności do celów spożywczych, farmaceutycznych i leczniczych, podyktowała potrzebę doskonalenia zagadnień dotyczących wydobycia i uzdatniania tego gazu.

W Polsce na skalę przemysłową naturalny dwutlenek węgla wydobywany jest wraz z wodami mineralnymi w uzdrowiskach Duszniki Zdrój i Krynica Zdrój. Wydobywany w Krynicy CO<sub>2</sub> z odwiertów „Zuber” posiada zanieczyszczenia w postaci CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>S, zatem oprócz zagadnień eksploatacyjnych w zagospodarowaniu tego gazu istotną rolę odgrywa problem jego uzdatniania. W uzdrowisku Krynica dwutlenek węgla wykorzystywany jest do saturacji wody mineralnej „Krynica” oraz do suchych kąpielí leczniczych w Zakładzie Przyrodolecznictwa, a jego nadmiar sprzedawany jest odbiorcom indywidualnym. Ponieważ do tej pory całość dwutlenku węgla jest skraplana, zachodzi potrzeba zmiany sposobu zagospodarowania tego gazu w aspekcie technicznym i ekonomicznym.

**2. UJĘCIE DWUTLENKU WĘGLA Z ODWIERTÓW „ZUBER”**

Z uwagi na rozmieszczenie odwiertów wód mineralnych na terenie Uzdrawiskowego Obszaru Górniczego w Krynicy oraz wielkości ciśnień i ilości separowanego z wód CO<sub>2</sub>, gaz ten jest ujęty i zagospodarowywany tylko z czterech odwiertów głębokich „Zuber”.

---

\* Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH, Kraków

W ramach realizowanego w latach 1996–1997 grantu celowego, dotyczącego wykonania dokumentacji hydrogeologicznej i ustalenia zasobów eksploatacyjnych wód leczniczych i dwutlenku węgla (jako kopaliny towarzyszącej) ze złoża w uzdrowisku Krynica [1], przeprowadzono rekonstrukcję wyposażenia wewnętrznego i napowierzchniowego odwiertów „Zuber I” i „Zuber II”. Rekonstrukcja w wymienionych odwiertach polegała na wymianie rur wydobywczych oraz zainstalowaniu nowych głowic eksploatacyjnych [12]. Po wykonaniu prac technicznych przeprowadzono badania hydrodynamiczne w celu doboru właściwego sposobu eksploatacji wody i gazu oraz ustalenia zasobów eksploatacyjnych. W wyniku przeprowadzonych pomiarów, także w odwiertach „Zuber III” i „Zuber IV”, ustalono parametry dla eksploatacji ciągłej w odwiertach „Zuber I” i „Zuber II”, eksploatację ciągłą z możliwością eksploatacji okresowej dla odwiertu „Zuber III” oraz eksploatację okresową dla odwiertu „Zuber IV”.

Na podstawie uzyskanych wyników badań hydrodynamicznych zostały ustalone dla każdego odwiertu zasoby eksploatacyjne dwutlenku węgla i zatwierdzone przez Ministra Środowiska wg stanu na dzień 31.08.1999 roku w następujących wielkościach [1, 4–7]:

- „Zuber I”: eksploatacja ciągła z wydajnością 765 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/dobę;
- „Zuber II”: eksploatacja ciągła z wydajnością 234 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/dobę;
- „Zuber III”: eksploatacja ciągła i okresowa z wydajnością 810 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/dobę;
- „Zuber IV”: eksploatacja okresowa z wydajnością 525 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/dobę.

Aktualnie z odwiertów „Zuber” wydobywane jest około 300 tys. m<sup>3</sup><sub>n</sub> CO<sub>2</sub> w ciągu roku. Badania jakościowe wydobywanego gazu, wykonane metodą chromatograficzną, wykazały średnią zawartość w nim CO<sub>2</sub> w ilości około 96%, a także obecność zanieczyszczeń gazowych w postaci CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> oraz zróżnicowanych dla poszczególnych odwiertów zawartości H<sub>2</sub>S (od kilku do kilkudziesięciu mg/m<sup>3</sup><sub>n</sub>) [12].

### 3. ZAGOSPODAROWANIE CO<sub>2</sub> W UZDROWISKU KRYNICA ZDRÓJ

Jak zaznaczono we wstępie, wydobywany w Krynicy dwutlenek węgla wykorzystywany jest do saturacji wody mineralnej, suchych kąpeli leczniczych oraz częściowo sprzedawany jest w formie skroplonej odbiorcom indywidualnym.

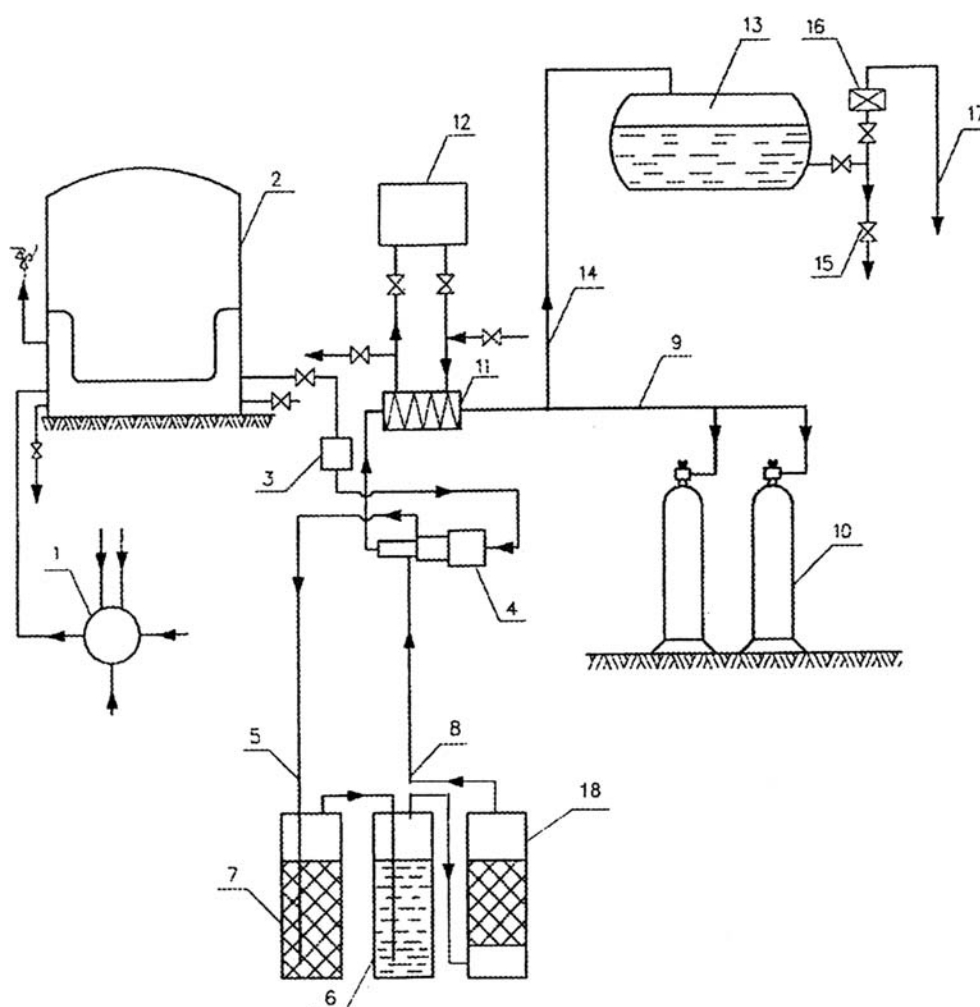
Do roku 1995 dwutlenek węgla skraplany w Wytwórni Ciekłego CO<sub>2</sub> przewożony był w butlach stalowych o pojemności 40 dm<sup>3</sup> i masie 70 kg do odległej o 300 m Rozlewni Wód Mineralnych. Dostarczając około 1200 kg dwutlenku węgla, po 30 kg w każdej butli, przewożono w ciągu doby około 2800 kg balastu w obie strony. Z uwagi na duży spadek temperatury przy regazacji ciekłego CO<sub>2</sub> istniała potrzeba podgrzewania butli, stąd konieczne było dostarczenie dużej ilości energii, co stanowiło (obok dużej ilości balastu i uciążliwość transportu) poważną niedogodność.

W celu usprawnienia dostawy gazu do Rozlewni Wód Mineralnych i suchych kąpeli w Zakładzie Przyrodolecznictwa zainstalowano w roku 1995 cysterne „Polcomat” na ciekły CO<sub>2</sub>. Dwutlenek węgla po regazacji dostarczany jest rurociągami do wymienionych wyżej miejsc odbioru. Jednak w dalszym ciągu całość gazu jest sprężana do ciśnienia 6–8 MPa i skraplana, co wymaga wkładu znacznych ilości energii. Przeprowadzono zatem analizę zapotrzebowania na moc przy aktualnym i proponowanym sposobie zagospodarowania CO<sub>2</sub> w uzdrowisku Krynica Zdrój.

Ze względu na stwierdzoną w gazie obecność  $H_2S$  w roku 2003 wprowadzono udoskonaloną technologię adsorpcyjnego odsiarczania z zastosowaniem impregnowanego węgla aktywnego [2, 3, 8].

### 3.1. Aktualny schemat zagospodarowania $CO_2$ z odwiertów „Zuber”

Uproszczony schemat instalacji do zagospodarowania  $CO_2$  z odwiertów „Zuber” przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Aktualny sposób zagospodarowania  $CO_2$  z odwiertów „Zuber” w Krynicy: 1 – węzeł zbiorczy gazu, 2 – zbiornik magazynowy gazu, 3 – odwadniacz, 4 – sprężarka, 5 i 8 – rurociągi gazowe, 6 – osuszka z  $CaCl_2$ , 7 – płuczka z  $KMnO_4$ , 9 i 14 – rurociągi ciekłego  $CO_2$ , 10 – stanowisko napełniania butli, 11 – skraplacz, 12 – chłodnica, 13 – zbiornik ciekłego  $CO_2$ , 15 i 17 – rurociągi gazowego  $CO_2$ , 16 – regazator, 18 – adsorber z impregnowanym węglem aktywnym

Dwutlenek węgla wydobywany z czterech odwiertów dopływa rurociągami do węzła zbiorczego (1), a następnie do niskociśnieniowego przeponowego zbiornika (2), skąd przez odwadniacz (3) zasysany jest przez trójstopniową sprężarkę (4). Gaz po drugim stopniu sprężania (1,6 MPa) przepływa kolejno przez kolumnę (7) z nadmanganianem potasu, kolumnę (6) z chlorkiem wapnia i kolumnę (18) wypełnioną impregnowanym węglem aktywnym. Do czasu zastosowania głębokiego odsiarczania na drodze adsorpcji (12.11.2003 r.) gaz po osuszeniu i przejściu przez kolumnę (7) kierowany był na trzeci stopień sprężania (8,0 MPa). Skroplony CO<sub>2</sub> w skraplaczu (11) doprowadzany jest rurociągiem (14) do zbiornika magazynowego ciekłego CO<sub>2</sub> (13). Część skroplonego CO<sub>2</sub> kierowana jest rurociągiem (9) do stanowiska napełniania butli (10). Zbiornik magazynowy ciekłego CO<sub>2</sub> (cysterna „Polcomat”) wyposażony jest w urządzenie do regazacji CO<sub>2</sub> (16), z którego dwutlenek węgla w postaci gazowej dostarczany jest rurociągami (15) i (17) do Rozlewni Wód Mineralnych oraz do suchych kąpiel w Zakładzie Przyrodolecznictwym. Aktualnie ilość skraplanego CO<sub>2</sub> wynosi 120 kg/h (60,73 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h).

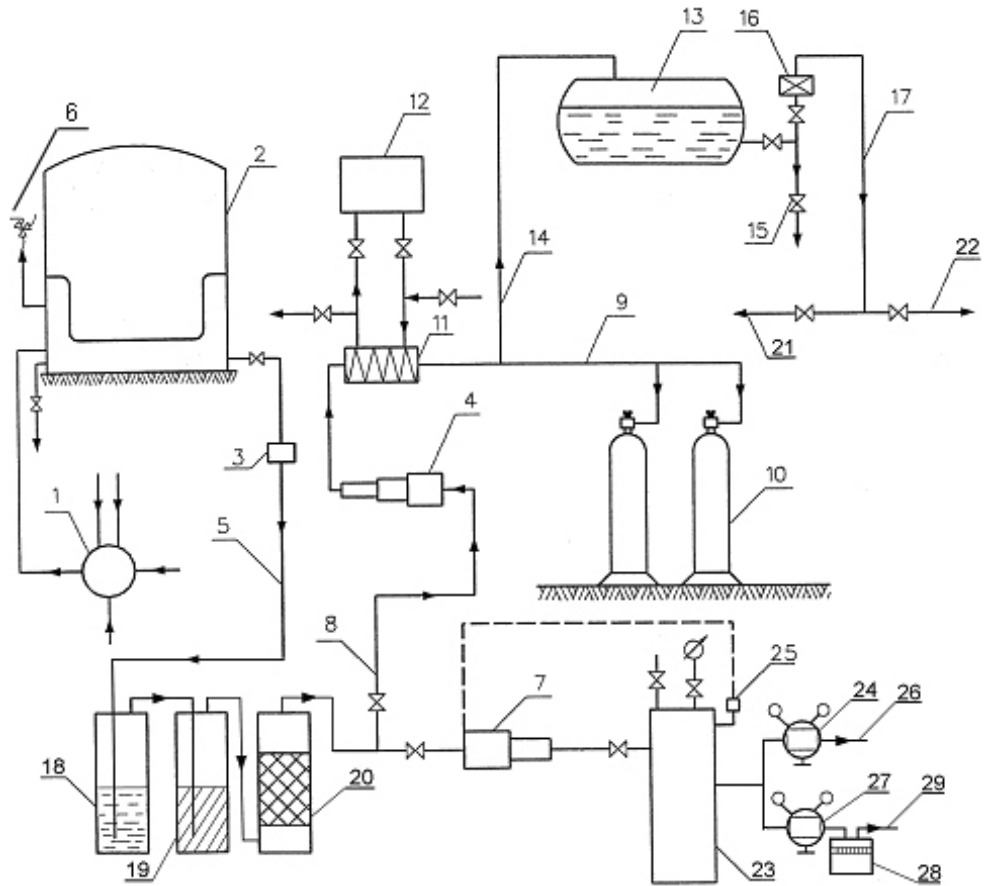
### 3.2. Zmodyfikowana instalacja zagospodarowania CO<sub>2</sub>

Mając na uwadze oszczędność energii potrzebnej do sprężania i skraplania całości wydobywanego z odwiertów „Zuber” dwutlenku węgla, zapewnienie stałej dostawy tego gazu do saturacji wody mineralnej „Krynica” i do suchych kąpiel leczniczych oraz możliwość zbytu nadwyżek CO<sub>2</sub> w postaci skroplonej, zaproponowano modyfikację sposobu jego zagospodarowania. Uproszczony schemat instalacji przedstawiono na rysunku 2.

Rozwiązanie to polega na zastosowaniu dwóch sprężarek: dwustopniowej dla sprężania CO<sub>2</sub> do ciśnienia 1,0 MPa oraz trzystopniowej dla sprężania pozostałej części CO<sub>2</sub> do ciśnienia około 8,0 MPa.

Zgodnie ze schematem (rys. 2), dwutlenek węgla z węzła zbiorczego (1), poprzez niskociśnieniowy zbiornik przeponowy (2) i odwadniacz (3), przepływa do układu sprężania przez płuczkę z nadmanganianem potasu (18), osuszkę gazu wypełnioną chlorkiem wapnia (19) oraz adsorber z impregnowanym węglem aktywnym (20). Sprężarka dwustopniowa (7) spręża gaz do ciśnienia 1,0 MPa i przetłacza go do zbiornika wyrównawczego (23), skąd poprzez reduktor (24) dopływa rurociągiem (26) pod wymaganym ciśnieniem do Rozlewni Wód Mineralnych. Drugim odgałęzieniem gaz poprzez reduktor (27) i gazomierz (28) dopływa rurociągiem (29) do stanowiska suchych kąpiel leczniczych. Praca bezolejowej sprężarki dwustopniowej sterowana jest automatycznie za pomocą ciśnieniowego przełącznika (25), zainstalowanego na zbiorniku wyrównawczym.

Nadmiar gazu uzdatnionego sprężany jest do 8,0 MPa w trzystopniowej sprężarce (4) i skraplany w skraplaczu (11). Ciekły CO<sub>2</sub> dopływa rurociągiem (14) do zbiornika (13) oraz rurociągiem (9) do stanowiska napełniania butli (10). Ze zbiornika (13) ciekły CO<sub>2</sub>, z przeznaczeniem do zbytu dla odbiorców indywidualnych, kierowany jest do rurociągu (15) lub też do regazatora (16), skąd jako gaz może być dostarczany do Rozlewni Wód Mineralnych rurociągiem (21) oraz do suchych kąpiel leczniczych rurociągiem (22).



**Rys. 2.** Zmodyfikowana instalacja dla zagospodarowania CO<sub>2</sub> w Krynicy: 1 – węzeł zbiorczy gazu, 2 – niskociśnieniowy zbiornik gazu, 3 – odwadniacz, 4 – sprężarka trzystopniowa, 5 rurociąg gazu, 6 – zawór bezpieczeństwa, 7 – sprężarka dwustopniowa, 8 – rurociąg gazu, 9 – rurociąg ciekłego CO<sub>2</sub>, 10 – butle na ciekły CO<sub>2</sub>, 11 – skraplacz, 12 – chłodnica, 13 – zbiornik ciekłego CO<sub>2</sub>, 14 – rurociąg ciekłego CO<sub>2</sub>, 15 – odpływ ciekłego CO<sub>2</sub>, 16 – regazator, 17 – rurociąg gazowy, 18 – płuczka z KMnO<sub>4</sub>, 19 – osuszka z CaCl<sub>2</sub>, 20 – adsorber z impregnowanym węglem aktywnym, 21 – rurociąg gazu do rozlewni, 22 – rurociąg gazu do suchych kąpiel leczniczych, 23 – zbiornik wyrównawczy gazu, 24 – reduktor, 25 – przełącznik ciśnieniowy, 26 – rurociąg gazu do rozlewni, 27 – reduktor, 28 – gazomierz, 29 – rurociąg gazu do suchych kąpiel

#### 4. ANALIZA TERMODYNAMICZNA SYSTEMU SPRĘŻANIA I SKRAPLANIA CO<sub>2</sub> W KRYNICY

Analizę skraplania i zagospodarowania dwutlenku węgla wydobywanego z odwiertów „Zuber” w Krynicy przeprowadzono w aspekcie oceny aktualnego stanu i uzasadnienia celowości wprowadzenia zmian w systemie skraplania i dostawy CO<sub>2</sub> do Rozlewni Wód Mineralnych i do suchych kąpiel.

Obliczenia zużycia energii przeprowadzono dla danych uzyskanych z warunków pracy aktualnie zainstalowanej sprężarki trzystopniowej oraz zaproponowanego wariantu z zastosowaniem dwóch sprężarek. Dla zapewnienia dostawy CO<sub>2</sub> dla potrzeb rozlewni wód i do suchych kąpieli zakłada się sprężanie gazu do ciśnienia 1,0 MPa. W celu doboru typu sprężarki obliczono temperaturę gazu po sprężeniu. Przy założeniu ciśnienia ssania  $P_s = 0,11$  MPa, temperatury ssania  $T_s = 293,15$  K i wykładnika politropy  $n = 1,3$  temperatura końcowa gazu przy sprężaniu jednostopniowym obliczona wzorem

$$T_k = T_s \left( \frac{P_k}{P_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad [\text{K}] \quad (1)$$

wynosi 486,79 K (213,64°C). Temperatura ta jest zbyt wysoka, w związku z czym należy zastosować sprężarkę dwustopniową z chłodzeniem międzystopniowym. Ciśnienie międzystopniowe oblicza się ze wzoru

$$P_m = \sqrt{P_s \cdot P_k} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

Po podstawieniu danych  $P_s = 0,11$  MPa i  $P_k = 1,0$  MPa otrzymano  $P_m = 0,332$  MPa. Zatem temperatura po pierwszym stopniu sprężania obliczona wzorem (1) wynosić będzie  $T_m = 377,66$  K (104,5°C). Sprężanie jednostopniowe ograniczone jest głównie temperaturą gazu po sprężaniu. W praktyce nie stosuje się sprężania w jednym stopniu powyżej ciśnienia 0,5 MPa oraz nie dopuszcza się przekroczenia temperatury 170°C. Wielostopniowe sprężanie ma tym większe uzasadnienie, im lepsze jest chłodzenie między stopniami [11].

Dla sprężania dwustopniowego z chłodzeniem międzystopniowym, przy założeniu obniżenia temperatury w chłodnicy do temperatury gazu zasysanego, moc efektywną sprężarki oblicza się z równania

$$N_e = \frac{nV_n P_n T_1 z}{(n-1)\eta_s \cdot T_n \cdot 3600} \left[ \left( \frac{P_m}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} + \left( \frac{P_k}{P_m} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 2 \right] \quad [\text{W}] \quad (3)$$

gdzie:

- $N_e$  – moc efektywna [W],
- $V_n$  – objętość sprężonego gazu [ $\text{m}_n^3/\text{h}$ ],
- $P_n$  – ciśnienie normalne 101 325 Pa,
- $P_1$  – ciśnienie gazu zasysanego [Pa],
- $P_k$  – ciśnienie gazu po sprężaniu [Pa],
- $P_m$  – ciśnienie międzystopniowe [Pa],
- $n$  – wykładnik politropy (1,3),
- $T_1$  – temperatura gazu zasysanego [K],
- $T_n$  – temperatura normalna 273,15 K,
- $z$  – współczynnik ściśliwości,
- $\eta_s$  – współczynnik sprawności.

Z uwagi na zróżnicowane stosunki sprężania w poszczególnych stopniach i różnych temperaturach gazu na ssaniu, w pracującej aktualnie sprężarce trzystopniowej, równanie na obliczenie mocy dla analizowanego przypadku przyjmie postać

$$N_e = \frac{nV_n P_n}{(n-1)\eta_s \cdot T_n \cdot 3600} \cdot \left[ z_1 T_1 \left( \frac{P_{m1}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \left\{ + z_2 T_2 \left[ \left( \frac{P_{m2}}{P_{m1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + z_3 T_3 \left[ \left( \frac{P_k}{P_{m2}} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \right\} [\text{W}] \quad (4)$$

gdzie:

$T_1, T_2, T_3$  – temperatury gazu zasysanego na poszczególnych stopniach sprężania [K],

$P_1$  – ciśnienie gazu zasysanego [Pa],

$P_{m1}$  – ciśnienie gazu po chłodnicy pierwszego stopnia [Pa],

$P_{m2}$  – ciśnienie gazu po chłodnicy drugiego stopnia [Pa],

$P_k$  – ciśnienie końcowe [Pa].

Pozostałe oznaczenia jak w równaniu (3).

Zgodnie z literaturą, współczynnik sprawności izotermicznej dla sprężarek tłokowych przy przepływie do  $100 \text{ m}^3/\text{h}$  wynosi  $\eta_s = 0,55$  [9, 10].

Obliczenia mocy przeprowadzono dla wielkości zestawionych w tabeli 1.

**Tabela 1**

Zestawienie wartości temperatury i ciśnienia w procesie sprężania i skraplania  $\text{CO}_2$  w Krynicy (8.11.2004 r.)

Miejsce pomiaru	Temperatura [K]	Ciśnienie [MPa abs.]	Współczynnik ściśliwości $z$
przed sprężarką	298,15	0,11	0,995
po pierwszym stopniu sprężania	333,15	0,50	–
po chłodnicy pierwszego stopnia	298,15	0,50	0,976
po drugim stopniu sprężania	343,15	1,70	–
po chłodnicy drugiego stopnia	303,15	1,70	0,922
po trzecim stopniu sprężania	353,15	8,10	–
w skraplaczu	290,15	8,10	–

W pierwszej kolejności obliczenie mocy przeprowadzono dla sprężarki dwustopniowej według równania (3). Po podstawieniu danych liczbowych:  $P_s = 0,11 \text{ MPa}$ ,  $P_n = 101\,325 \text{ Pa}$ ,

$T_s = 293,15$  K,  $T_n = 273,15$  K,  $V_n = 60,73$  m<sup>3</sup>/h,  $z = 0,9763$ ,  $\eta_s = 0,55$ ,  $P_m = 0,332$  MPa,  $P_k = 1,0$  MPa i  $n = 1,3$  otrzymano moc równą  $N_e = 5977$  W/60,73 m<sup>3</sup>, co daje  $N_e = 0,0984$  kW/m<sup>3</sup>.

Dla sprężania trzystopniowego, przy założeniu szczelności w układzie cylindrów aktualnie pracującej sprężarki w Wytwórni Ciekłego CO<sub>2</sub> w Krynicy, obliczona za pomocą równania (4) moc wynosi:  $N_e = 16\ 700$  W/60,73 m<sup>3</sup>, co daje  $N_e = 0,275$  kW/m<sup>3</sup>.

W celu stwierdzenia faktycznego zapotrzebowania na moc dla wymienionej wyżej sprężarki trzystopniowej dokonano w dniu 8.11.2004 r. pomiaru zużycia energii. Na podstawie odczytu licznika zużycie energii wynosiło w ciągu jednej godziny 32 kWh/60,73 m<sup>3</sup>, co odpowiada mocy  $N_e = 0,527$  kW/m<sup>3</sup>. Ponieważ różnica pomiędzy mocą obliczoną i otrzymaną z pomiarów jest znaczna, postanowiono przeprowadzić pomiar kontrolny. Pomiaru dokonano w dniu 19.11.2004 r. w czasie jednogodzinnego napełniania butli gazowych. Parametry eksploatacyjne ustabilizowano dla ciśnienia odpowiadającego procesowi napełniania butli ciekłym CO<sub>2</sub> (tab. 2). W ciągu godziny pracy sprężarki uzyskano 94 kg ciekłego CO<sub>2</sub>, tj. 47,57 m<sup>3</sup> gazu. Zużycie energii odczytane z licznika wynosiło 32 kWh.

**Tabela 2**

Zestawienie wartości temperatury i ciśnienia w procesie sprężania i skraplania CO<sub>2</sub> w Krynicy (pomiar kontrolny 19.11.2004 r.)

Miejsce pomiaru	Temperatura [K]	Ciśnienie [MPa]	Współczynnik ściśliwości $z$
przed sprężarką	285,15	0,088	0,997
po pierwszym stopniu sprężania	332,65	0,399	0,981
po chłodnicy drugiego stopnia	291,65	0,399	–
po drugim stopniu sprężania	350,15	1,400	0,934
po chłodnicy drugiego stopnia	293,65	1,400	–
po trzecim stopniu sprężania	353,15	7,500	0,825
w skraplaczu	289,15	7,500	–

Dla parametrów zestawionych w tabeli 2 i przy przyjęciu  $\eta_s = 0,55$  obliczono za pomocą równania (4) zapotrzebowanie na moc, które wynosi  $N_e = 13,212$  kW/47,57 m<sup>3</sup>, co odpowiada  $N_e = 0,277$  kW/m<sup>3</sup>.

Z uwagi na dużą różnicę pomiędzy mocą obliczoną i otrzymaną za pomocą pomiaru, przeprowadzono obliczenia współczynnika sprawności, korzystając z równania (4) w rozwiązaniu na  $\eta_s$ . Rzeczywista wartość tego współczynnika dla warunków skraplania w dniu 8.11.2004 r. wynosi  $\eta_s = 0,287$ , a dla warunków skraplania w dniu 19.11.2004 r.  $\eta_s = 0,227$ . Niska sprawność jest wynikiem złego stanu technicznego sprężarki, która pracuje bez remontu od ponad dziewięciu lat. Jest to sprężarka bezsmarowa z uszczelnieniami tłoków



pierścieniami tarflenowymi. Prawdopodobna nieszczelność tłoków w cylindrach sprężarki sprawia, że zasysa ona tylko  $47,57 \text{ m}_n^3/\text{h}$ , podczas gdy nowa sprężarka tego typu zasysa  $150 \text{ m}_n^3/\text{h}$ , co stanowi 31,7% objętości nominalnej. Ponadto uwagę zwraca fakt niejednakowego stosunku sprężania na poszczególnych stopniach:  $\varepsilon_1 = 4,54$ ,  $\varepsilon_2 = 3,51$ ,  $\varepsilon_3 = 5,36$ .

Uwzględniając powyższe, omawianą sprężarkę poddano remontowi, a następnie w dniu 5.04.2005 r. dokonano ponownego pomiaru zużycia energii. Z odczytu licznika wynika, że zużycie to wynosiło 36 kWh przy sprężaniu i skraplaniu 200 kg CO<sub>2</sub> w ciągu godziny, tj.  $V_n = 101,215 \text{ m}_n^3/\text{h}$ , co daje moc równą  $N_e = 0,356 \text{ kW}/\text{m}_n^3$  (tab. 3).

**Tabela 3**

Zestawienie wartości temperatury i ciśnienia w procesie sprężania i skraplania CO<sub>2</sub> w Krynicy (pomiar kontrolny 5.04.2005 r.)

Miejsce pomiaru	Temperatura [K]	Ciśnienie [MPa]	Współczynnik ściśliwości $z$
przed sprężarką	288,15	0,011	0,955
po pierwszym stopniu sprężania	356,15	0,3	0,984
po chłodnicy drugiego stopnia	306,15	0,3	–
po drugim stopniu sprężania	354,15	1,5	0,942
po chłodnicy drugiego stopnia	302,15	1,5	–
po trzecim stopniu sprężania	373,15	7,0	–
w skraplaczu	303,15	7,0	–

Analizując pracę sprężarki, w pierwszej kolejności dokonano porównań z teoretyczną nominalną wydajnością dla tego typu sprężarki, tj.  $150 \text{ m}_n^3$  gazu w ciągu godziny. Z pomiaru przeprowadzonego dnia 19.11.2004 r., wynika, że sprężarka przed remontem zasysała tylko  $47,57 \text{ m}_n^3/\text{h}$ , tj. 31,7% objętości nominalnej, natomiast po remoncie, jak wynika z pomiaru z dnia 5.04.2005 r., przy wydajności  $101,215 \text{ m}_n^3/\text{h}$  współczynnik ten wynosi 67,5% objętości nominalnej, tj. o ponad 100% więcej niż przed remontem. Obliczony współczynnik sprawności sprężarki po remoncie wynosi  $\eta_s = 0,413$ . W stosunku do wartości sprawności sprężarki przed remontem jest to wzrost o 82,5%.

Porównanie zużycia energii przez sprężarkę trzystopniową, sprężającą całość ujmowanego CO<sub>2</sub> do ciśnienia 8,0 MPa, ze zużyciem energii przy zastosowaniu proponowanego rozwiązania sprężanie części gazu tylko do ciśnienia 1,0 MPa, wykazało znaczne oszczędności. Uwzględniając dodatkowo zmniejszenie kosztów chłodzenia międzystopniowego zysk z zastosowania omawianego systemu sprężania będzie znacznie wyższy.

W ramach modernizacji instalacji dla zagospodarowania CO<sub>2</sub> z odwiertów „Zuber” wprowadzono w roku 2003 udoskonalony sposób adsorpcyjnego odsiarczania gazu przy użyciu impregnowanego węgla aktywnego [3]. Następnie w roku 2004 wykonano czyszczenie zbiornika magazynowego CO<sub>2</sub> oraz izolację antykorozyjną farbą epoksydową. Wymieniono także przeponę w tym zbiorniku, która została wykonana z tkaniny poliestrowej

typu TOMWIL, powlekanej mieszanką polichlorowinyłową. Ostateczną opinię o dopuszczeniu ww. tkaniny do wykonania przepony w zbiorniku magazynowym gazu, będącej w kontakcie z CO<sub>2</sub> przeznaczonym do celów spożywczych, wydał Państwowy Zakład Higieny – Zakład Badań Żywności i Produktów Użytku w Warszawie, na podstawie certyfikatu zgodności nr 111/2002.

## 5. PODSUMOWANIE

1. Przeprowadzone obliczenia i pomiary wykazały bardzo małą sprawność sprężarki pracującej w Wytwórni Ciekłego CO<sub>2</sub> w Krynicy. W związku z powyższym konieczne było przeprowadzenie jej kapitalnego remontu.
2. W celu zmniejszenia kosztów ponoszonych na sprężanie i skraplanie całości CO<sub>2</sub>, a następnie jego regazację na potrzeby rozlewni wód i do suchych kąpielni leczniczych, należy rozważyć równoczesne zastosowanie dwóch sprężarek: dwustopniowej dla sprężania gazu tylko do ciśnienia 1,0 MPa oraz trzystopniowej dla sprężania do ciśnienia 8,0 MPa i skraplania pozostałej części CO<sub>2</sub> przeznaczonego dla odbiorców indywidualnych.
3. W ramach modernizacji sposobu zagospodarowania CO<sub>2</sub> w Krynicy, również w celu zmniejszenia kosztów jednostkowych, należy udoskonalić system chłodzenia sprężarki (lub sprężarek) poprzez sprawnie działający układ zamknięty lub doprowadzenie tańszej wody chłodzącej, np. z ujęcia będącego własnością uzdrowiska.
4. Zastosowanie udoskonalonego sposobu odsiarczania gazu metodą adsorpcyjną przy użyciu impregnowanego węgla aktywnego pozwoliło na dokładne oczyszczenie CO<sub>2</sub> z siarkowodoru, co stwierdzono na podstawie wyników oznaczeń bieżących i analiz chromatograficznych wykonanych w styczniu 2004 r. oraz po renowacji zbiornika magazynowego w styczniu 2005 r.

## LITERATURA

- [1] Ciężkowski W. *et al.*: *Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby eksploatacyjne wód leczniczych i dwutlenku węgla (jako kopaliny towarzyszącej) ze złożeń w Uzdrowisku Krynica oraz ustalająca zasoby dyspozycyjne wód (zwykłych oraz leczniczych i o własnościach leczniczych w rozlewni „Kryniczanki”*. Wrocław, Politechnika Wrocławska 1999
- [2] Duliński W., Ropa C.: *Zastosowanie impregnowanych węgli aktywnych w procesie oczyszczania gazów*. Rocznik AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, z. 21/1, 2004
- [3] Duliński W.: *Ujęcie i odsiarczanie dwutlenku węgla w Krynicy*. Materiały szkoleniowe, Krynica, 2003
- [4] Duliński W. *et al.*: *Badania złożowe w odwiertach „Zuber” w Krynicy oraz problem odsiarczania dwutlenku węgla z tych ujęć*. Przegląd Geologiczny, vol. 47, nr 6, 1999
- [5] Duliński W. *et al.*: *Hydro- i termodynamiczne problemy eksploatacji wody i CO<sub>2</sub> na przykładzie odwiertów „Zuber” w Krynicy*. Zeszyty Naukowe AGH, Sozologia i Sozotechnika, z. 1, Kraków 1992

- [6] Duliński W., Ropa C.: *Badania hydrodynamiczne w odwiertach „Zuber II” i „Zuber IV” w Krynicy*. Zeszyty Naukowe AGH Górnictwo, z. 4, Kraków 1994
- [7] Duliński W., Ropa C.: *Analiza warunków eksploatacji odwiertu „Zuber III”*. Zeszyty Naukowe AGH Wiertnictwo Nafta Gaz, z. 8, Kraków 1991
- [8] Hennig J., Klein U., Yüntgen H.: *Aktivkohle-Verfahren zur Schwefelwasserstoff Entfernung VDJ-Forschungsheft*. Nr 615, Düsseldorf 1983
- [9] Giszewski J.: *Przesyłanie, rozdział i magazynowanie paliw gazowych*. Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej 1977
- [10] Heyer F., Wieke S.: *Verdichtern und Antriebsmaschinen für Erdgasspeicherung und den Erdgastransport*. Auswahl unter technischen und wirtschaftlichen Aspekten. Erdöl-Erdgas-Kohle, Band 114, Heft 11, 1998
- [11] Wilk Z.: *Gaz ziemny*. Katowice, Wyd. Śląsk 1964
- [12] Dokumentacja powykonawcza pomiarów złożowych w odwiertach „Zuber I” i „Zuber II”. Krosno, Zespół Rzeczoznawców SITPNiG, Grupa Terenowa Krosno 1997