

Tomasz Śliwa*, Andrzej Gonet*

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI WYMIANY CIEPŁA W WYMIENNIKACH OTWOROWYCH O RÓŻNEJ KONSTRUKCJI**

1. WPROWADZENIE

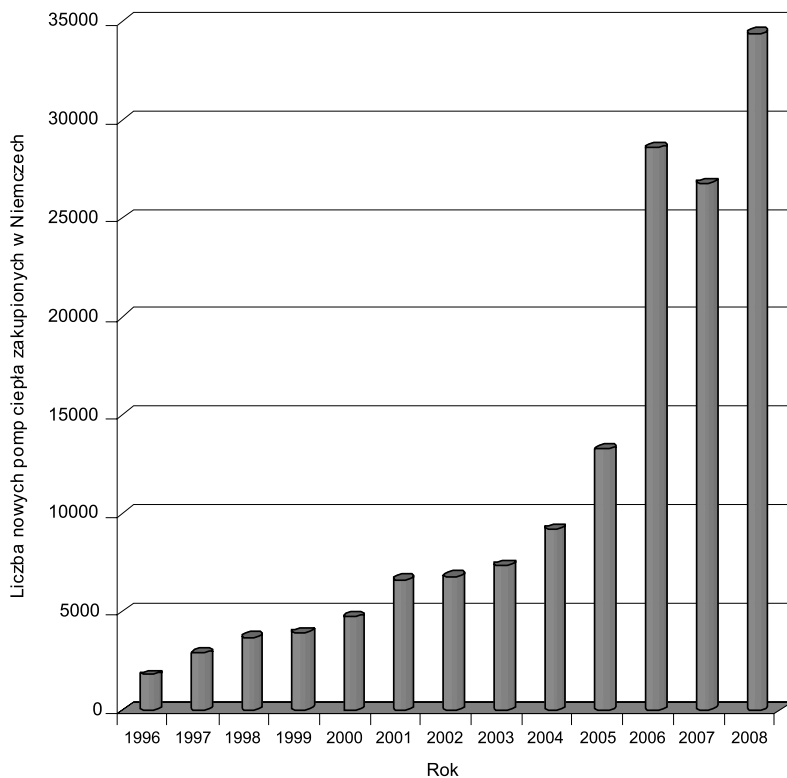
Wykorzystanie górotworu w instalacjach grzewczych i chłodniczych staje się coraz bardziej popularne. Sprężarkowe pompy ciepła zasilane energią elektryczną wykorzystują górotwór jako rezerwuar ciepła. Dzieje się tak zarówno w państwach, które wytwarzają energię elektryczną w źródłach odnawialnych (np. Szwecja, Norwegia), jak też w źródłach tradycyjnych¹ (np. Niemcy, Francja, USA, Kanada). Dla przykładu na rysunku 1 przedstawiono liczbę nowych pomp ciepła instalowanych w Niemczech w latach 1996–2008, a na rysunku 2 sumaryczną głębokość wykonywanych rocznie wierceń otworowych wymienników ciepła, realizowanych w poszczególnych latach w Szwajcarii. Widać coroczny wykładniczy wzrost sumarycznej głębokości wykonanych wymienników otworowych (1900 kilometrów w 2008 r.!). Z rysunku 2 wynika, że wzrost dotyczy nie tylko instalacji w obiektach nowo budowanych, ale także w obiektach remontowanych. W 2009 roku na rynku szwajcarskim istniało ponad 40 certyfikowanych firm zajmujących się wierceniem otworowych wymienników ciepła [9].

Rysunek 3 pokazuje łączną głębokość (w metrach) wykonanych w Polsce otworów przeznaczonych na instalacje otworowych wymienników ciepła. Wielkość ta została uzyskana na podstawie danych jedynie dwóch polskich firm wiertniczych (Demax Drill i Sator). Obserwowany wzrost liczby metrów przewierconych otworów nie może być jednak bezpośrednio przełożony na wzrost mocy grzewczej. Wymienniki otworowe mogą pobierać ciepło z górotworu (np. ogrzewanie wnętrza, ciepłej wody użytkowej), jak też je wprowadzać do górotworu (klimatyzacja wnętrza, wytwarzanie chłodu technologicznego).

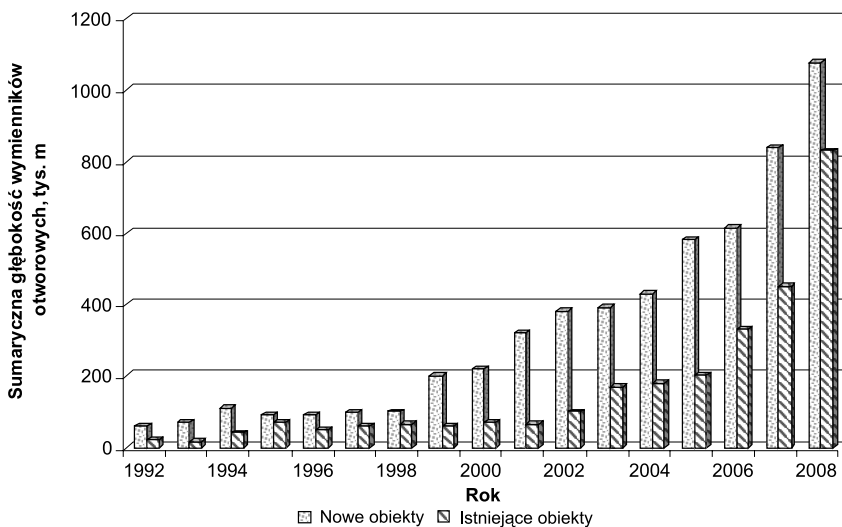
* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków

** Praca zrealizowana w ramach grantu MNiSW nr N N524 353738, nr umowy AGH 18.18.190.505

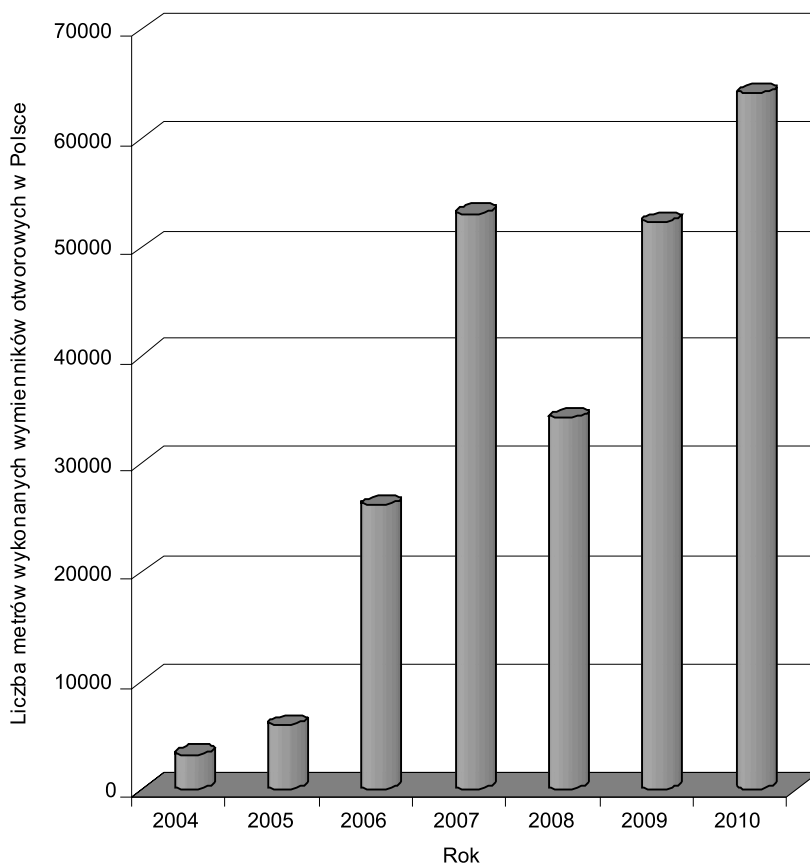
¹ W tym w elektrowniach jądrowych.



Rys. 1. Liczba nowych pomp ciepła instalowanych w Niemczech w latach 1996–2008 [11]



Rys. 2. Sumaryczna głębokość wykonywanych rocznie wierceń otworowych wymienników ciepła w poszczególnych latach w Szwajcarii [10]



Rys. 3. Głębokość (w metrach) otworowych wymienników ciepła wykonywanych przez jedynie dwie firmy wiertnicze [8, 12]

Najbardziej obrazowym wskaźnikiem funkcjonowania otworowych wymienników ciepła powinna być roczna ilość energii wymienianej pomiędzy górotworem a powierzchnią instalacją grzewczo-chłodniczą, i to w obydwu kierunkach – do i z górotworu. Jest to jednak wartość trudna do określenia i inna w przypadku każdej instalacji.

W praktyce najczęściej mówi się o mocy wymienników otworowych (kolumna „c” w tabeli 1) i/lub o rocznej ilości pozyskiwanej energii (kolumna „d” w tabeli 1).

Moc grzewcza, czyli strumień energii przekazywanej przez wymiennik otworowy, przede wszystkim zależy od radialnego gradientu temperatury otwór – górotwór. W drugiej kolejności decyduje o niej konstrukcja otworowego wymiennika ciepła.

Na ilość potencjalnie pozyskiwanej energii ma wpływ wielkość rezerwuaru, czyli rozmieszczenie i głębokość wymienników otworowych oraz pojemność cieplna skał i nasycenie ich wodą. Liczba wymienników otworowych decyduje natomiast o mocy grzewczej wymienianej z górotworem w określonych warunkach temperaturowych.

Tabela 1

Średnie wartości parametrów eksploatacyjnych otworowych wymienników ciepła w skałach różnego typu dla pojedynczego wymiennika o głębokości 150 m [9]

Rodzaj skały	Przewodność cieplna skał	Moc grzewcza	Roczna produkcja energii
		z jednego metra bieżącego wymiennika otworowego	
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$W \cdot m^{-1}$	$kWh \cdot m^{-1}$
a	b	c	d
Skały zbite	3,0	do 70	100÷120
Skały luźne nasycone wodą	2,0	45÷50	90
Skały luźne suche	1,5	do 25	50

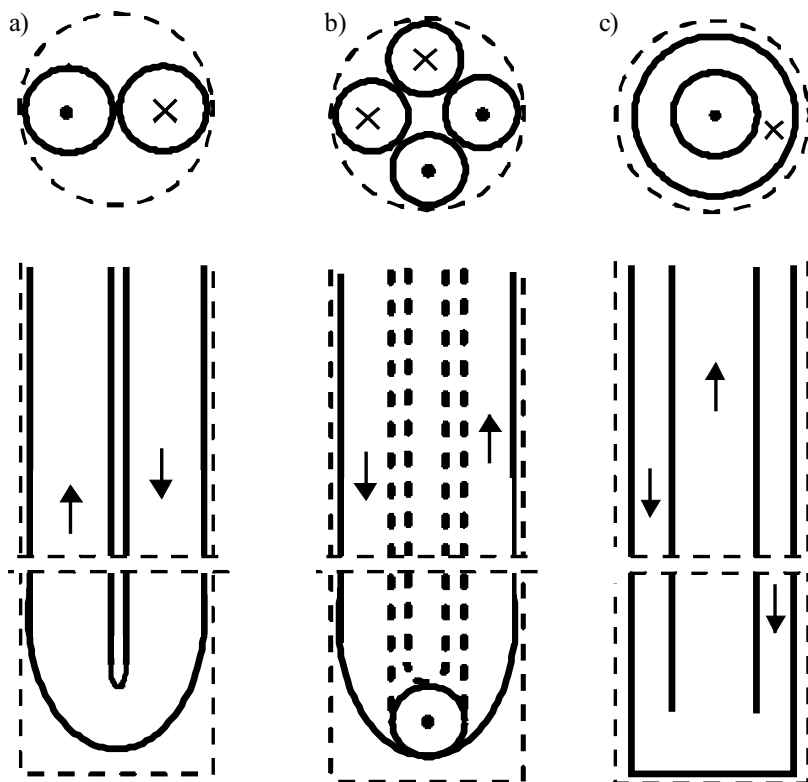
W Polsce tematyka otworowych wymienników ciepła była w sposób naukowy przedstawiana w dosyć szerokim zakresie. Traktują o nich m.in. prace realizowane w AGH w Krakowie przez Goneta [1], Goneta i Śliwę [2], Śliwę [14, 15] oraz Śliwę i Goneta [13]. Interesujące prace z tego obszaru tematycznego były realizowane w ZUT przez Kujawę i Nowaka [4, 5], Kujawę i Szaflika [6] oraz Kujawę [3]. Dotyczyły one między innymi modelowania wymiany ciepła w płytkich i głębokich wymiennikach otworowych z przepływem przeciwbieżnym i koncentrycznym, analiz wykorzystania istniejących głębokich odwiertów do budowy otworowych wymienników ciepła, obliczeń i analizy wykorzystania tzw. podziemnego zamkniętego geotermicznego wymiennika ciepła do pozyskiwania energii z górotworu. Tematyką tą w IGSMiE PAN zajmował się także Pająk [7].

2. KONSTRUKCJE OTWOROWYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA

Podstawowym parametrem systemu otworowych wymienników ciepła jest możliwość uzyskania moc grzewcza. Parametr ten w znacznej mierze wpływa na głębokość i liczbę otworowych wymienników ciepła. Dodatkowo ich rozmieszczenie wpływa na ilość możliwej do wymiany energii (zasoby ciepła).

Na rozmiary systemu w aspekcie obciążeń szczytowych ma także wpływ konstrukcja wymienników otworowych. Najczęściej wykonywane są wymienniki przedstawione na rysunku 4. W przypadku z rysunku 4a do otworu wiertniczego wprowadza się pojedynczą u-rurkę wykonaną z tworzywa sztucznego (najczęściej z polietylenu). Rysunek 4b przedstawia podobny układ z wprowadzonymi do otworu dwoma u-rurkami. Na rysunku 4c przedstawiono układ centryczny wymiennika otworowego.

W tabeli 2 przedstawiono jakościowe zestawienie parametrów charakteryzujących opisywane konstrukcje. Jako koszty eksploatacyjne rozumieć należy koszty związane z wymuszeniem cyrkulacji nośnika ciepła.



Rys. 4. Schematy konstrukcji wymienników otworowych:
a) z pojedynczą u-rurką; b) z podwójną u-rurką; c) układ centryczny [1]

Tabela 2

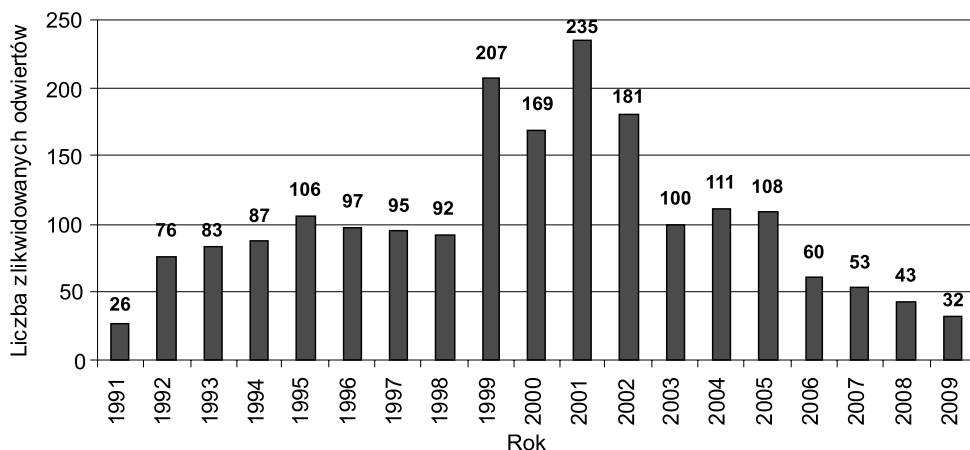
Jakościowa charakterystyka otworowych wymienników ciepła wg konstrukcji z rysunku 4

Parametr	Rodzaj konstrukcji wymiennika otworowego wg rysunku 4		
	a	b	c
Koszty inwestycyjne	najmniejsze	średnie	największe
Koszty eksploatacyjne	największe	średnie	najmniejsze
Moc grzewcza	najmniejsza	średnia	największa

W otworach specjalnie wykonanych w celu pozyskiwania ciepła ziemi możliwe jest zastosowanie dowolnej konstrukcji. Najczęściej do głębokości 150 m wykonuje się instalacje w postaci u-rurek, a przy większych głębokościach instalacje z wymiennikiem centrycznym.

Ze względu na dużą liczbę otworów wykonanych w Polsce na potrzeby naftowe powstała idea adaptacji wyeksploatowanych odwiertów na otworowe wymienniki ciepła [14].

Jest ona korzystna wówczas, gdy w pobliżu takich odwiertów znajduje się odbiorca ciepła (chłodu) najlepiej niskotemperaturowego. Takich przypadków w kraju można znaleźć wiele, a zdecydowana większość starych odwiertów została wykonana na Podkarpaciu i w Małopolsce, i do tego w pobliżu zabudowań wymagających ogrzewania. Na rysunku 5 pokazano liczbę likwidowanych rocznie odwiertów w południowo-wschodniej Polsce.



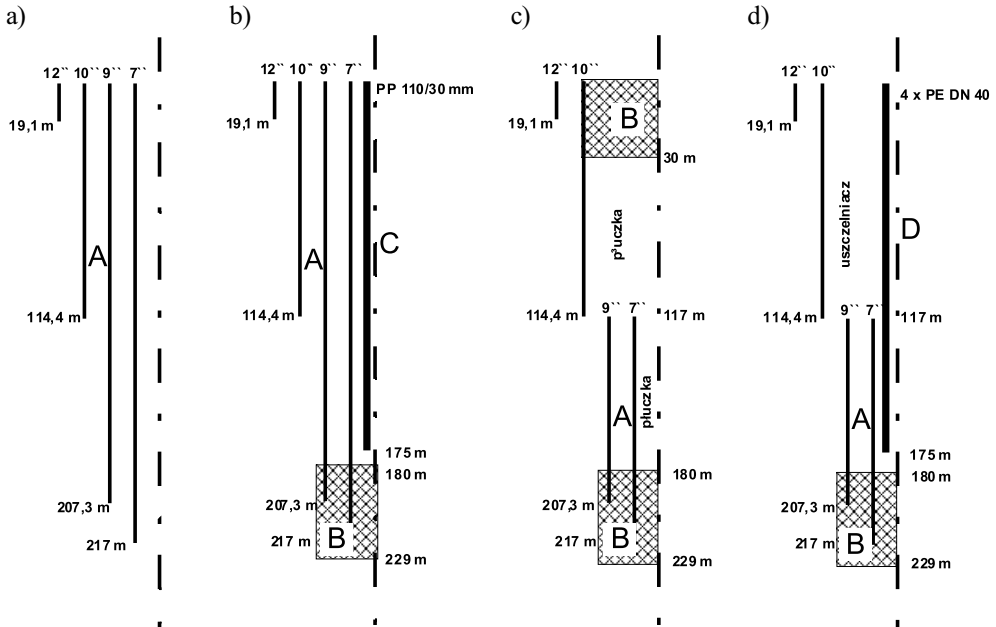
Rys. 5. Liczba odwiertów zlikwidowanych przez Zakład Robót Górniczych Sp. z o.o. w Krośnie [1]

W istniejących odwiertach można niezależnie od głębokości zastosować konstrukcję wymiennika najkorzystniejszą pod względem kosztów eksploatacyjnych i parametrów wymiany ciepła, czyli konstrukcję centryczną.

Zastosowanie konstrukcji centrycznej wymaga zapewnienia odpowiedniej szczelności obudowy odwiertu. W przypadku braku szczelności rur okładzinowych po odizolowaniu najwyższego horyzontu produktywnego można zastosować układ zbudowany z u-rurek i po ich zainstalowaniu w odwiercie wykonać uszczelnianie, które będzie równoznaczne z doszczelnieniem konstrukcji odwiertu.

W odwiertach wcześniej zlikwidowanych także można zastosować instalację wymiany ciepła z górotworem [13]. Konieczne jest wtedy częściowe przywrócenie funkcjonalności odwiertu. Wymaga ono jednak wykonania prac wiertniczych, co związane jest z większymi kosztami. W odwiertach zlikwidowanych z odzyskiem rur należy zwiercić przypowierzchniowy korek uszczelniający. W odwiertach zlikwidowanych z pozostawieniem rur okładzinowych najczęściej wystarczy zwiercić tylko krótszy niż poprzednio korek przypowierzchniowy i wprowadzić rury wewnętrzne, wykonując układ centrycznego wymiennika, po korzystnym wyniku próby szczelności, albo układ u-rurek przy braku szczelności.

Na rysunku 6 przedstawiono porównawcze zestawienie konstrukcji jednego z odwiertów złoża Turaszówka służącego do eksploatacji ropy naftowej (a) oraz odwiertu po jego likwidacji (c), a także odwiertu zaadaptowanego na otworowy wymiennik ciepła (b) i otworowego wymiennika powstałego po przywróceniu zlikwidowanego odwiertu (d).



Rys. 6. Schemat możliwej konstrukcji odwiertu zaadaptowanego na wymiennik otworowy (b), odwiertu po likwidacji (c) i wymiennika otworowego powstałego po przywróceniu zlikwidowanego odwiertu (d) na bazie odwiertu naftowego złoża Turaszówka (a): A – rury okładzinowe, B – korek uszczelniający, C – kolumna rur wewnętrznych w układzie współosiowym, D – kolumna rur wewnętrznych w postaci podwójnej u-rurki [13]

3. MOŻLIWOŚCI WYMIANY CIEPŁA POMIĘDZY POWIERZCHNIĄ A GÓROTWOREM

Otworowy wymiennik ciepła można nazwać urządzeniem służącym do transferu ciepła pomiędzy górotworem a powierzchniową instalacją grzewczą, chłodniczą lub grzewczo-chłodniczą. W celu prowadzenia badań wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią terenu a górotworem na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH w Krakowie utworzono Laboratorium Geoenergetyki.

W tabeli 3 podano litologię skał przewierconego profilu do głębokości 78 m. Wcześniej na głębokości 82 m stwierdzono strop utworów jurajskich. Parametry termiczne były wyznaczone na podstawie literatury. Przyjmowano głębokość wymiennika otworowego równą głębokości otworu. Poprawka uwzględniająca głębokość studzienki to 1,8 m (tab. 3 – strop warstwy nr 1).

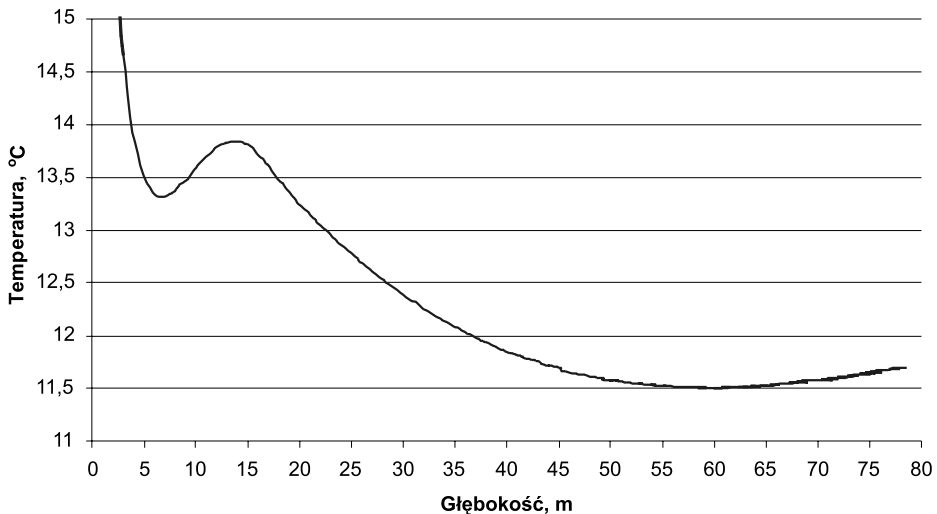
Jednym z podstawowych parametrów profilu jest jego pierwotna temperatura średnia (wzory (1) i (9)). W przypadku otworów Laboratorium Geoenergetyki wielkość ta była wyznaczana szwajcarskim przyrządem pomiarowym NIMO-T. Na rysunku 7 przedstawiono profil temperatury w jednym z otworowych wymienników ciepła. We wszystkich wymiennikach

profil ten był identyczny. Temperatura warstw przypowierzchniowych (ok. 20 m) jest specyficzna dla daty pomiaru. Był to początek lipca 2008 r. Średnia temperatura profilu z rysunku 7 wynosi 12,4 °C. W strefie wymienników otworowych przebiega magistrała ciepłownicza, która zaburza naturalny modelowy profil temperatury i powoduje podwyższenie temperatury średniej. Instalacja wymiany ciepła laboratorium umożliwiła pozyskiwanie ciepła z górotworu na cele grzewcze oraz wprowadzanie ciepła do górotworu podczas klimatyzacji.

Tabela 3

Litologia w profilu przewierconym otworami na terenie Laboratorium Geoenergetyki WWiNiG AGH (z uwzględnieniem głębokości studzienek). Parametry termiczne podano na podstawie analizy literaturowej [1]

Lp.	Strop, m p.p.t.	Spąg, m p.p.t.	Miąższość warstwy, m	Litologia	Przewodność ciepna, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Ciepło właściwe objętościowe, $MJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
1	1,8	2,2	0,4	grunty gliniaste	1,5	2
2	2,2	2,6	0,4	namuły	1,5	2,2
3	2,6	4,0	1,4	piasek drobny i pylasty	2	2
4	4,0	6,0	2	piasek drobny	2,2	2,5
5	6,0	15,0	9	pospółka i żwir	1,8	2,4
6	15,0	30,0	15	ił szary	2	2,3
7	30,0	78,0	48	iłołupek szary	2,1	2,3
Średnia ważona					2,039	2,309



Rys. 7. Pierwotny profil temperatury w otworowych wymiennikach ciepła Laboratorium Geoenergetyki WWiNiG AGH (2 lipca 2008 r.)

4. EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA

Rozkład temperatury w górotworze T będący funkcją czasu t i promienia r od osi otworowego wymiennika ciepła podczas pracy ze stałą mocą cieplną q opisuje równanie liniowego źródła ciepła [2]:

$$T(r,t) = T_0 + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \cong T_0 + \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha \cdot t}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (1)$$

gdzie:

T_0 – średnia temperatura profilu, K,

q – straty ciepła na jednostkę głębokości, $W \cdot m^{-1}$:

$$q = \frac{Q}{H} \quad (2)$$

Q – moc grzewcza, W,

H – głębokość otworu, m,

λ – przewodność cieplna skał, $W \cdot m^{-1} K^{-1}$,

α – dyfuzyjność cieplna określona wzorem (6),

r – promień od osi otworu, m,

γ – stała Eulera, $\gamma = 0,5772156$,

u – wielkość określona wzorem:

$$u = \frac{r^2}{4\alpha \cdot t} \quad (3)$$

W warunkach prowadzenia testu reakcji termicznej [2] temperatura nośnika ciepła w funkcji czasu w układzie półlogarytmicznym przybiera charakter liniowy. Nachylenie krzywej może zostać użyte do oceny efektywnej przewodności cieplnej za pomocą wzoru:

$$\lambda_{ef} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot k} \quad (4)$$

gdzie k jest współczynnikiem nachylenia linii trendu (prostej), przedstawiającej przebieg temperatury nośnika ciepła w funkcji logarytmu naturalnego czasu trwania fazy grzewczej testu TRT.

Efektywny współczynnik przewodzenia ciepła skał można obliczyć także ze wzoru [1]:

$$\lambda_{ef} = \frac{q}{4 \cdot \pi} \frac{\left[\ln \frac{t_2}{t_1} + \frac{r_o^2 (t_1 - t_2)}{4 \cdot \alpha \cdot t_1 \cdot t_2} \right]}{T(t_2) - T(t_1)} \quad (5)$$

gdzie:

- t_1 – czas początkowy, s,
- t_2 – czas końcowy, s,
- $T(t_1)$ – średnia temperatura nośnika ciepła w czasie t_1 ,
- $T(t_2)$ – średnia temperatura nośnika ciepła w czasie t_2 ,
- q – straty ciepła na jednostkę głębokości wg wzoru (2), $W \cdot m^{-1}$,
- α_s – dyfuzyjność cieplna skał, $m^2 \cdot s^{-1}$:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (6)$$

gdzie:

- ρ – gęstość (masa właściwa) skał, $kg \cdot m^{-3}$,
- c – ciepło właściwe masowe skał, $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

Rezystancję termiczną otworowego wymiennika ciepła, w $m \cdot K \cdot W^{-1}$, wyznacza się natomiast ze wzoru:

$$R_q = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_o^2} + \frac{r_o^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \gamma \right] \quad (7)$$

W praktyce wyrażenie $\frac{r_o^2}{4 \cdot \alpha \cdot t}$ pomija się, a wzór przyjmuje postać:

$$R_q = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_o^2} - \gamma \right] \quad (8)$$

Rezystancja termiczna otworowego wymiennika ciepła określona jest zależnością:

$$R_b = \frac{1}{q} (T_{sr} - T_0) - R_q = \frac{1}{q} (T_{sr} - T_0) - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \left[\ln \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_o^2} - \gamma \right] \quad (9)$$

gdzie:

- T_{sr} – średnia temperatura nośnika ciepła, $T_{sr} = (T_z + T_p)/2$, °C,
- T_z – temperatura zasilania, °C,
- T_p – temperatura powrotu, °C,
- r_o – promień otworu, m,
- λ – przewodność cieplna skał, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$,
- t – czas, s.

Efektywna przewodność cieplna skał oraz rezystancja termiczna otworu mają bezpośredni wpływ na potencjalną moc grzewczą otworowego wymiennika ciepła. W tabelach 4–6 przedstawiono wartości cieplnej przewodności efektywnej oraz oporności cieplne otworów zmierzone w otworowych wymiennikach ciepła Laboratorium Geoenergetyki WwNiG AGH. Wartości te uzyskano na podstawie analizy krzywej wzrostu temperatury nośnika ciepła podczas testów reakcji termicznej (TRT). TRT wykonywano przy trzech wartościach strumienia objętości nośnika ciepła, przy stałej mocy grzewczej wynoszącej 4 kW.

Parametry konstrukcyjne otworowych wymienników ciepła Laboratorium Geoenergetyki zestawiono w tabeli 4. Wszystkie otwory mają głębokość 78 m i średnicę 143 mm. Układ wymiany ciepła podczas badań TRT był wypełniony wodą. W tabelach 5–7 literą K oznaczono klasyczny kierunek cyrkulacji nośnika ciepła (przestrzenia pierścieniową w dół i rurą wewnętrzną do góry) w wymienniku nr 1, a literą O kierunek odwrotny. Wartości parametrów zostały określone dla przedziału czasowego testu od chwili $5r_o^2/\alpha_s$ (r_o – średnica otworu, α_s – dyfuzyjność cieplna skał) do końca fazy grzewczej testu. Przewodność cieplna skał obliczana była ze wzorów (4) oraz (5). Oporność termiczna otworowych wymienników była określana za pomocą wzoru (9), przy czym za wartość l przyjmowano przewodność cieplną skał λ_s (tab. 3) oraz przewodność efektywną λ_{ef} .

Tabela 4

Budowa otworowych wymienników ciepła Laboratorium Geoenergetyki WwNiG AGH

Wyszczególnienie	Otwór AGH LG 1	Otwór AGH LG 2	Otwór AGH LG 3	Otwór AGH LG 4	Otwór AGH LG 5
Zabudowa otworu	rura okładzino-wa PE Ø 90 mm o grubości ściany 5,4 mm; rura wewnętrzna PE Ø 40 mm o grubości ściany 2,4 mm	pojedyncza u-rurka PE Ø 40 mm o grubości ściany 2,4 mm	pojedyncza u-rurka PE Ø 40 mm o grubości ściany 2,4 mm	pojedyncza u-rurka PE Ø 40 mm o grubości ściany 2,4 mm	podwójna u-rurka PE Ø 32 mm o grubości ściany 2,4 mm
Wypełnienie otworu (uszczelnienie)	zaczyn uszczelniający na bazie cementu ($\lambda=1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	zaczyn uszczelniający na bazie cementu ($\lambda=1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	zaczyn uszczelniający (Thermocem) na bazie cementu o podwyższonej przewodności ciepła ($\lambda=2,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	żwir o granulacji 8÷16 mm oraz dwa korki łożowe – Compactonit ($\lambda=1,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	zaczyn uszczelniający na bazie cementu ($\lambda=1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
Ilość substancji wypełniającej rury wymiennika ciepła	0,361972 m ³	0,151733 m ³	0,151733 m ³	0,151733 m ³	0,181202 m ³

Tabela 5

Wartości efektywnej przewodności cieplnej oraz oporności termicznej wymienników otworowych przy strumieniu objętości nośnika ciepła $\dot{V} = 12 \text{ dm}^3/\text{min}$

Lp.	Obliczany parametr	Numer otworowego wymiennika ciepła	
		1 (K)	3
1	Przewodność cieplna skał dla temperatury zasilania T_z , $\lambda_{ef}(T_z)$, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2,0756	2,0082
2	Przewodność cieplna skał dla temperatury powrotu T_p , $\lambda_{ef}(T_p)$, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2,0743	2,0079
3	Przewodność cieplna skał dla temperatury średniej T_{sr} , $\lambda_{ef}(T_{sr})$, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	2,0749	2,0080
4	Przewodność cieplna skał określona wzorem (5), λ_{ef} , $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	1,6994	1,9335
5	Oporność otworowego wymiennika dla R_q ze wzoru (8) i przewodności skał wg tabeli 3, R_b dla λ_s , $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	0,2125	0,1389
6	Oporność otworowego wymiennika dla R_q ze wzoru (8) i przewodności skał wg pozycji 3, R_b dla λ_{ef} , $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	0,1702	0,1274
7	Oporność otworowego wymiennika dla R_q ze wzoru (7) i przewodności skał wg tabeli 3, R_b dla λ_s , $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	0,212	0,1384
8	Oporność otworowego wymiennika dla R_q ze wzoru (7) i przewodności skał wg pozycji 3, R_b dla λ_{ef} , $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$	0,1696	0,1269

Tabela 6

Wartości efektywnej przewodności cieplnej oraz oporności termicznej wymienników otworowych przy strumieniu objętości nośnika ciepła $\dot{V} = 20 \text{ dm}^3/\text{min}$ (w przypadku otworowego wymiennika ciepła nr 5 wartość średnia z dwóch testów TRT)

Lp.	Obliczany parametr*	Numer otworowego wymiennika ciepła					
		1 (K)	1 (O)	2	3	4	5
1	$\lambda_{ef}(T_z)$	2,3848	2,2302	1,9575	2,0554	2,0267	2,2045
2	$\lambda_{ef}(T_p)$	2,3849	2,2301	1,9577	2,0549	2,0269	2,2045
3	$\lambda_{ef}(T_{sr})$	2,3849	2,2301	1,9576	2,0552	2,0268	2,2045
4	λ_{ef}	1,8914	1,7751	1,7397	1,9920	1,9750	1,97835
5	R_b dla λ_s	0,1603	0,1705	0,1415	0,0991	0,1136	0,13855
6	R_b dla λ_{ef}	0,1287	0,127	0,1142	0,0893	0,0953	0,1175
7	R_b dla λ_s	0,1599	0,1701	0,141	0,0985	0,1132	0,1382
8	R_b dla λ_{ef}	0,1281	0,1264	0,1135	0,0887	0,0948	0,11705

* Oznaczenia jak w tabeli 5.

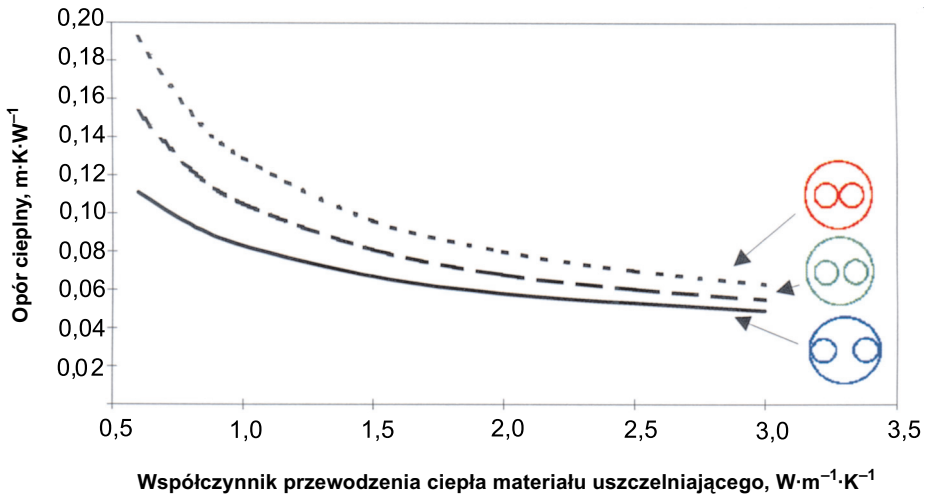
Tabela 7

Wartości efektywnej przewodności cieplnej oraz oporności termicznej wymienników otworowych przy strumieniu objętości nośnika ciepła $\dot{V} = 27 \text{ dm}^3/\text{min}$

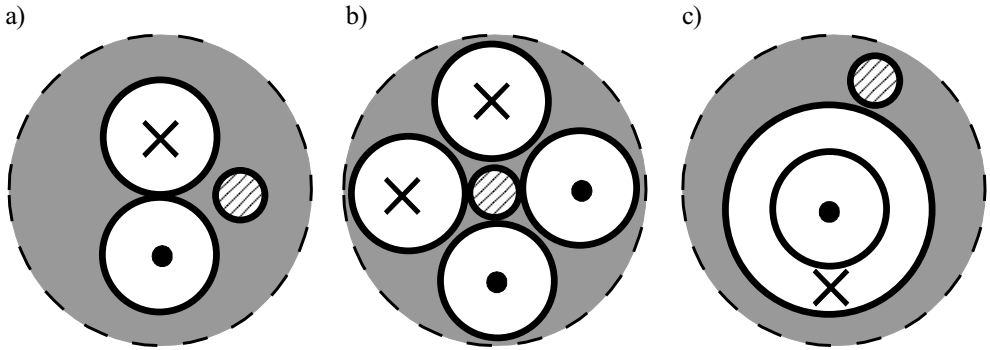
Lp.	Obliczany parametr*	Numer otworowego wymiennika ciepła		
		1 (K)	2	3
1	$\lambda_{ef}(T_z)$	2,4458	2,3459	2,3489
2	$\lambda_{ef}(T_p)$	2,4457	2,3808	2,3484
3	$\lambda_{ef}(T_{sr})$	2,4457	2,3632	2,3487
4	λ_{ef}	1,8072	2,0554	2,1619
5	R_b dla λ_s	0,1621	0,1406	0,0962
6	R_b dla λ_{ef}	0,1098	0,1301	0,0964
7	R_b dla λ_s	0,1617	0,1402	0,0958
8	R_b dla λ_{ef}	0,1092	0,1296	0,0959

* Oznaczenia jak w tabeli 5.

Oporność termiczna otworowego wymiennika ciepła o konstrukcji pojedynczej u-rurki zależy od dystansu pomiędzy osiami rur u-rurki, co pokazuje rysunek 8, a także od rodzaju wypełnienia przestrzeni skała – rury wymiennika ciepła. Sposoby uszczelniania tej przestrzeni pokazano na rysunku 9.

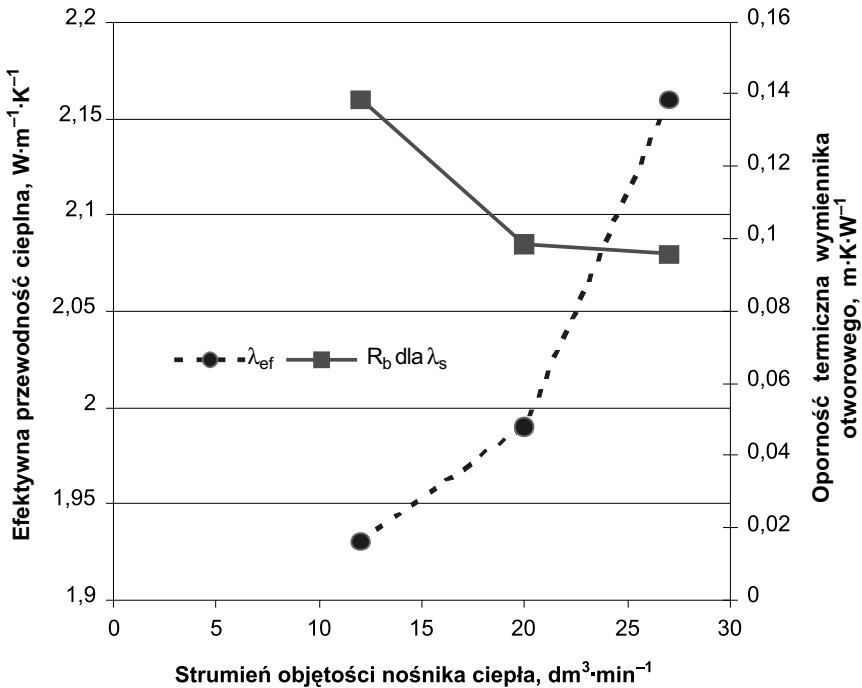


Rys. 8. Opór cieplny otworu dla pojedynczej u-rurki jako funkcja współczynnika przewodzenia ciepła materiału wypełniającego wymiennik otworowy dla trzech różnych pozycji u-rurki w otworze [1]



Rys. 9. Położenie rurki do wprowadzania zacynu uszczelniającego na przekroju poziomym otworowego wymiennika ciepła (obszar zakreskowany) dla wymiennika:
 a) z pojedynczą u-rurką; b) z podwójną u-rurką; c) centrycznego

Jak pokazuje rysunek 10, wartość przewodności cieplnej efektywnej otworowego wymiennika ciepła wraz ze wzrostem strumienia objętości nośnika ciepła się zwiększa, a oporność termiczna się zmniejsza.



Rys. 10. Zależność efektywnej przewodności cieplnej w wymienniku otworowym nr 3 oraz oporności termicznej od strumienia objętości nośnika ciepła

5. WNIOSKI

1. Efektywność wymiany ciepła jest zależna przede wszystkim od efektywnej przewodności cieplnej skał, a także od oporności termicznej otworu. Moc grzewcza zależy głównie od radialnego gradientu temperatury nośnik ciepła – górotwór. Natomiast ilość możliwej do pozyskania (zmagazynowania) energii zależy od wielkości rezerwuaru udostępnionego wymiennikami otworowymi (od liczby wymienników otworowych, ich rozmieszczenia i głębokości).
2. W celu prowadzenia badań nad efektywnością wymienników otworowych o różnych konstrukcjach na Wydziale Wiertnictwa, Nafty i Gazu AGH utworzono Laboratorium Geoenergetyki. Laboratorium jest wyposażone w pięć otworowych wymienników ciepła o głębokości 78 m każdy.
3. W celu określenia efektywnej przewodności cieplnej skał i oporności termicznej otworowych wymienników ciepła wykonano szereg testów reakcji termicznej (TRT).
4. Na podstawie testów reakcji termicznej można stwierdzić, że wyznaczona efektywna przewodność cieplna wzrasta w niewielkim stopniu wraz ze wzrostem strumienia objętości nośnika ciepła podczas testu. Natomiast oporność termiczna otworowych wymienników ciepła maleje. Obserwuje się także polepszenie parametrów w przypadku zwiększonej przewodności cieplnej uszczelnienia wymienników otworowych.
5. W konstrukcji z podwójną u-rurką i układu centrycznego wartości efektywnej przewodności są wyższe niż w przypadku zastosowania pojedynczej u-rurki.
6. Dobór konstrukcji wymienników otworowych do konkretnej instalacji powinien uwzględniać zarówno efektywność energetyczną, jak też ekonomiczną.

LITERATURA

- [1] Gonet A. (red.): *Metodyka identyfikacji potencjału cieplnego górotworu wraz z technologią wykonywania i eksploatacji otworowych wymienników ciepła*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2011.
- [2] Gonet A., Śliwa T.: *Testowanie otworowych wymienników ciepła (TRT)*. GLOBEnergia, nr 1, s. 14, 17.
- [3] Kujawa T.: *Characteristics of Extracting Geothermal Heat for One-Hole Systems*. Proceedings of European Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany 2007.
- [4] Kujawa T., Nowak W.: *Shallow and Deep Vertical Geothermal Heat Exchangers as Low Temperature Sources for Heat Pumps*. Proceeding of World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan 2000.
- [5] Kujawa T., Nowak W.: *Thermal Calculations of Geothermal Heat Utilising One-Well Systems with Both Injection and Production*. Proceeding of World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan 2000.
- [6] Kujawa T., Szaflik W.: *Thermal Field in an Aquiferous Layer behind a Vertical Heat Exchanger*. Proceeding of World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan 2000.

- [7] Pająk L.: *Usage of Existing Deep Bore-Holes as Heat Exchangers*. Proceeding of World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan 2000.
- [8] Rak P.: *Zestawienie wykonywanych otworowych wymienników ciepła*. Demax Drill, Komorniki 2011.
- [9] Rybach L.: *Market Penetration of BHE Coupled Heat Pumps – the Swiss Success Story*. Geothermal Resources Council Transaction, vol. 22, 1998, s. 451–455.
- [10] Rybach L., Signorelli S.: *Country Update of Switzerland*. Proceedings of World Geothermal Congress 2010, Indonesia, Bali 2010.
- [11] Schellschmidt R., Sanner B., Pester S., Schulz R.: *Geothermal Energy Use in Germany*. Proceedings of World Geothermal Congress 2010, Indonesia, Bali 2010.
- [12] Skowroński G.: *Zestawienie wykonywanych otworowych wymienników ciepła*. Sator, Koźienice 2011.
- [13] Śliwa T., Gonet A.: *Koncepcja wykorzystania likwidowanych odwiertów złoża Turaszówka do pozyskiwania ciepła celem ogrzewania krytej pływalni*. Wiertnictwo Nafta Gaz, t. 23/1, 2006, s. 469–475.
- [14] Śliwa T.: *Techniczno-ekonomiczne problemy adaptacji wykorzystanych odwiertów na otworowe wymienniki ciepła*. AGH WwNiG, Kraków 2002 (rozprawa doktorska).
- [15] Śliwa T.: *Wybrane systemy geotermalne w skałach suchych*. Konferencja Naukowa „Aktualny stan i perspektywy rozwoju górnictwa w aspekcie ochrony środowiska”, Dniepropietrowsk, Ukraina 1996.