

KU 0394 pozycja wydawnictw naukowych  
Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2011  
ISBN 978-83-7464-374-4

Redaktor Wydawnictw AGH: *Jan Sas*

Komitet Naukowy Wydawnictw AGH:  
*Tomasz Szmuc* (przewodniczący),  
*Marek Capiński*,  
*Jerzy Klich*,  
*Witold K. Krajewski*,  
*Tadeusz Sawik*,  
*Mariusz Ziółko*

Recenzenci: *prof. dr hab. inż. Marek Dziubiński*  
*prof. dr hab. inż. Kazimierz Twardowski*

Afilacje Autorów:

Andrzej Gonet, Tomasz Śliwa, Stanisław Stryczek, Aneta Sapińska-Śliwa, Albert Złotkowski –  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu  
Marek Jaszczur – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw  
Leszek Pająk – Polska Akademia Nauk, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią

Publikacja finansowana przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.  
Projekt badawczo-rozwojowy R 0900503

Projekt okładki: *Albert Złotkowski*

Redakcja: *Joanna Ciągala*

Skład komputerowy: „Andre”, tel. 12 422 83 23

---

Redakcja Wydawnictw AGH  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel. 12 617 32 28, tel./faks 12 636 40 38  
e-mail: [redakcja@wydawnictwoagh.pl](mailto:redakcja@wydawnictwoagh.pl)  
<http://www.wydawnictwa.agh.edu.pl>

---

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b> .....	9
Literatura .....	13
<b>2. Potencjał cieplny i sposoby udostępniania ciepła Ziemi</b> .....	15
2.1. Parametry charakterystyczne dla potencjału cieplnego Ziemi .....	15
2.2. Rozkład pola temperaturowego na terenie Polski .....	18
2.3. Źródła ciepła .....	24
2.4. Najważniejsze sposoby udostępnienia energii geotermalnej .....	25
2.4.1. Wody termalne .....	26
2.4.2. Gorące suche skały .....	30
2.4.3. Wysady solne .....	31
2.4.4. Otworowe wymienniki ciepła .....	32
2.4.5. Koncepcja wykonywania otworowych wymienników ciepła w palach nośnych .....	32
2.4.6. Możliwości zagospodarowania ciepła górotworu i wody w kopalniach .....	35
2.4. Podsumowanie .....	37
Literatura .....	38
<b>3. Metodyka oceny potencjału cieplnego górotworu</b> .....	40
3.1. Metodyka wyliczania ilości ciepła wokół otworu .....	40
3.2. Własności termiczne skał .....	43
3.3. Hydrogeologiczne uwarunkowania wymiany ciepła w wymiennikach otworowych .....	50
3.3.1. Uwarunkowania pola hydrodynamicznego w warstwach wodonośnych .....	50
3.3.2. Pola temperaturowe w środowisku wód podziemnych .....	52
3.3.3. Wpływ czynników geologicznych na możliwość wykorzystania ciepła niskotemperaturowych wód podziemnych .....	55

3.3.4. Opracowanie założeń do modelu matematycznego pracy otworowego wymiennika ciepła w zakresie filtracji wody w ośrodku porowatym .....	59
3.3.5. Modelowanie filtracji wód w obszarze działania otworowych wymienników ciepła .....	62
3.4. Test reakcji termicznej .....	64
3.4.1. Określanie przewodności cieplnej skał profilu otworowego wymiennika ciepła .....	66
3.4.2. Średnia temperatura górotworu .....	70
3.4.3. Oporność cieplna otworowego wymiennika ciepła .....	74
3.4.4. Niepewność w określaniu efektywnego współczynnika przewodzenia ciepła .....	76
3.5. Profilowanie temperatury .....	76
3.6. Podsumowanie .....	80
Literatura .....	80
<b>4. Analiza techniki wiercenia otworów .....</b>	<b>83</b>
4.1. Wykonywanie otworów z zastosowaniem metody obrotowej .....	83
4.2. Wiercenie otworów z zastosowaniem metody udarowo-obrotowej .....	89
4.3. Kryteria doboru urządzeń wiertniczych do wykonania otworowych wymienników ciepła .....	94
4.4. Charakterystyka techniczna wybranych urządzeń wiertniczych .....	96
4.5. Podsumowanie .....	100
Literatura .....	101
<b>5. Analiza technologii wiercenia otworów w różnych warunkach geologiczno-złożowych .....</b>	<b>103</b>
5.1. Mechaniczne parametry technologii wiercenia .....	103
5.2. Ogólne zasady doboru płuczki wiertniczej .....	112
5.3. Hydrauliczne parametry technologii wiercenia otworów .....	114
5.4. Podsumowanie .....	117
Literatura .....	119
<b>6. Analiza konstrukcji otworowych wymienników ciepła i zasady jej doboru .....</b>	<b>121</b>
6.1. Konstrukcje typowych otworowych wymienników ciepła .....	122
6.2. Nietypowe konstrukcje otworowych wymienników ciepła .....	128
6.2.1. Wymienniki ciepła w palach nośnych .....	128
6.2.2. Wymienniki ciepła w kopalniach podziemnych .....	129
6.2.3. Ukośne wymienniki otworowe .....	130
6.3. Materiały na rury .....	130
6.3.1. Wymienniki u-kształtne .....	134
6.3.2. Wymienniki centryczne .....	134

6.4. Rodzaje połączeń rur .....	143
6.5. Dystansery .....	143
6.6. Centralizatory .....	145
6.7. Obciążniki i buty rur .....	148
6.8. Uzbrojenie dolnej części kolumny rur .....	150
6.9. Rurki do zatłaczania zaczynu uszczelniającego .....	152
6.10. Próba szczelności .....	153
6.11. Naprężenia w rurach wymienników otworowych .....	154
6.11.1. Analiza stanu naprężeń w u-rurkach wymienników otworowych .....	154
6.11.2. Analiza stanu naprężeń w rurach wewnętrznych centrycznego otworowego wymiennika ciepła .....	154
6.12. Adaptacja otworów wiertniczych na otworowe wymienniki ciepła .....	159
6.12.1. Specjalnie wykonywane otwory wiertnicze .....	159
6.12.2. Możliwości adaptacji istniejących odwiertów .....	160
6.13. Otworowe wymienniki ciepła w Laboratorium Geoenergetyki WwNiG AGH .....	164
6.14. Podsumowanie .....	171
Literatura .....	172
<b>7. Dobór konfiguracji otworowych wymienników ciepła .....</b>	<b>174</b>
7.1. Sposób łączenia wymienników otworowych .....	174
7.2. Wpływ konfiguracji otworowych wymienników ciepła na parametry eksploatacyjne .....	178
7.3. Podsumowanie .....	195
Literatura .....	196
<b>8. Uszczelnianie otworowych wymienników ciepła .....</b>	<b>197</b>
8.1. Kryteria doboru zaczynów do uszczelniania otworowych wymienników ciepła .....	198
8.2. Metodyka badań laboratoryjnych parametrów technologicznych zaczynów uszczelniających .....	199
8.3. Analiza materiałów użytych do badań laboratoryjnych .....	206
8.4. Wyniki badań laboratoryjnych .....	216
8.5. Technika i technologia uszczelniania otworowych wymienników ciepła .....	227
8.6. Podsumowanie .....	231
Literatura .....	232
<b>9. Modelowanie otworowych wymienników ciepła .....</b>	<b>237</b>
9.1. Analiza modeli wymiany ciepła .....	237

9.2. Analiza możliwości symulacji eksploatacji otworowych wymienników ciepła z wykorzystaniem symulatora TOUGH2.0 .....	259
9.2.1. Pojedynczy wymiennik w układzie centrycznym .....	261
9.2.2. Pojedynczy wymiennik w układzie podwójnej u-rurki .....	270
9.3. Numeryczny model cylindryczny .....	274
9.4. Model Śliwy i Goneta .....	282
9.5. Model Eskilsona .....	285
9.6. Podsumowanie .....	289
Literatura .....	290
<b>10. Symulacje komputerowe z wykorzystaniem symulatora otworowych wymienników ciepła BoHeX .....</b>	<b>293</b>
10.1. Model matematyczny transportu ciepła w otworowym wymienniku ciepła .....	293
10.2. Model numeryczny transportu ciepła w otworowym wymienniku ciepła .....	299
10.2.1. Model numeryczny transportu ciepła w procesie dyfuzji i filtracji (w obszarze II) oraz konwekcji wymuszonej (w obszarze I) .....	300
10.2.2. Dekompozycja obszaru .....	305
10.2.3. Generacja siatek obliczeniowych .....	307
10.3. Weryfikacja modelu matematycznego transportu ciepła w górotworze na podstawie danych pomiarowych i rozwiązań analitycznych .....	309
10.3.1. Model Johansena .....	310
10.3.2. Model Côté i Konrada .....	311
10.3.3. Model Lu .....	312
10.3.4. Weryfikacja modelu matematycznego .....	312
10.4. Wyniki obliczeń .....	321
10.4.1. Rozkład temperatury w górotworze .....	321
10.4.2. Obliczenia dla pojedynczego koncentrycznego wymiennika otworowego .....	325
10.4.3. Analiza numeryczna wpływu własności górotworu na transport ciepła wokół otworowego wymiennika ciepła .....	327
10.4.4. Analiza numeryczna wpływu parametrów konstrukcyjnych współosiowego otworowego wymiennika ciepła na przepływ ciepła w górotworze .....	334
10.4.5. Wyniki obliczeń numerycznych dla otworowych wymienników ciepła Laboratorium Geoenergetyki WwNiG AGH – pojedynczy wymiennik .....	338

10.4.6. Wyniki obliczeń numerycznych dla otworowych wymienników ciepła Laboratorium Geoenergetyki WWiG AGH – pole wymienników .....	344
10.5. Podsumowanie .....	348
Literatura .....	350
<b>11. Analiza parametrów technologicznych eksploatacji otworowych wymienników ciepła .....</b>	<b>353</b>
11.1. Nośniki ciepła .....	355
11.1.1. Woda .....	358
11.1.2. Glikole .....	359
11.1.3. Alkohole .....	364
11.2. Opory przepływu nośnika ciepła .....	364
11.3. Warianty pracy centrycznego wymiennika ciepła .....	371
11.4. Wykorzystanie gazu jako nośnika energii w wymienniku centrycznym .....	384
11.5. Przykłady instalacji podziemnych magazynów ciepła .....	385
11.6. Optymalny strumień objętości nośnika ciepła .....	395
11.7. Układy bezpośredniego parowania .....	398
11.8. Podsumowanie .....	399
Literatura .....	400
<b>12. Ekonomiczne, energetyczne i ekologiczne aspekty pracy systemów grzewczo-chłodniczych opartych na otworowych wymiennikach ciepła .....</b>	<b>401</b>
12.1. Pompy ciepła w instalacjach grzewczych .....	401
12.2. Energetyczna ocena efektywności stosowania pomp ciepła .....	403
12.3. Ekonomiczne aspekty oceny efektywności stosowania pomp ciepła .....	407
12.3.1. Kryteria oceny ekonomicznej .....	408
12.3.2. Wzrost wartości pieniężnej w czasie – dyskontowanie .....	409
12.3.3. Określenie stopy dyskontowej .....	409
12.3.4. Obliczenie wartości obecnej .....	410
12.3.5. Kryteria analizy ekonomicznej oparte na wartości obecnej .....	411
12.3.6. Kryterium wartości zaktualizowanej netto .....	411
12.3.7. Efektywność ekonomiczna układów z otworowymi wymiennikami ciepła .....	412
12.4. Efektywność ekologiczna stosowania sprężarkowych pomp ciepła .....	421

12.5. Spoziomowany jednostkowy koszt energii .....	425
12.6. Podsumowanie .....	426
Literatura .....	427
<b>Wnioski końcowe</b> .....	<b>429</b>
<b>Podsumowanie</b> .....	<b>433</b>
<b>Summary</b> .....	<b>437</b>