

Spis treści

1. Wstęp	9
Literatura	13
2. Potencjał cieplny i sposoby udostępniania ciepła Ziemi	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
3. Metodyka oceny potencjału cieplnego górotworu	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
4. Analiza techniki wiercenia otworów	83
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
5. Analiza technologii wiercenia otworów w różnych warunkach geologiczno-złożowych	103
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
6. Analiza konstrukcji otworowych wymienników ciepła i zasady jej doboru	121
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
7. Dobór konfiguracji otworowych wymienników ciepła	174
7.1. Sposób łączenia wymienników otworowych	174
7.2. Wpływ konfiguracji otworowych wymienników ciepła na parametry eksploatacyjne	178
7.3. Podsumowanie	195
Literatura	196
8. Uszczelnianie otworowych wymienników ciepła	197
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
9. Modelowanie otworowych wymienników ciepła	237
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
10. Symulacje komputerowe z wykorzystaniem symulatora otworowych wymienników ciepła BoHeX	293
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
11. Analiza parametrów technologicznych eksploatacji otworowych wymienników ciepła	353
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
12. Ekonomiczne, energetyczne i ekologiczne aspekty pracy systemów grzewczo-chłodniczych opartych na otworowych wymiennikach ciepła	401
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
Wnioski końcowe	429
Podsumowanie	433
Summary	437